

เอกสารอ้างอิง

1. Lindmayer, J., and Allison, J.F., "The Violet Cell: An Improved Silicon Solar Cell," Comsat Tech. Rev., Vol.3, 1-22, 1973.
2. Fossum, J.G., "Physical Operation of Back-Surface-Field Silicon Solar Cells," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-24, NO.4, 322-329, 1977.
3. Davis, J.R., and Rohatgi, A., "Theoretical Design Considerations for Back Surface Field Solar Cell," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 569-573, 1980.
4. Wu, C.Y., and Shen, W.Z., "The Open-Circuit Voltage of Back-Surface-Field (BSF) p-n Junction Solar Cells in Concentrated Sunlight," Solid-State Electronic, 23, 209-216, 1980.
5. Dhariwal, S.R., and Kulshreshtha, A.P., "Theory of Back Surface Field Silicon Solar Cells in Concentrated Sunlight," Solid-State Electronic, 24, 1161-1165, 1981.
6. Yablonovitch, E., and Cody, G.D., "Intensity Enhancement in Textured Optical Sheets For Solar Cells," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-29, No.2, 300-305, 1982.
7. Bean, K.E., "Anisotropic Etching of Silicon," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-25, No.10, 1185-1193, 1978.
8. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2530.
9. Rohatgi, A., and Rai-Choudhury, P., "An Approach Toward 20 Percent - Efficient Silicon Solar Cell," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-33, No.1, 1-7, 1986.
10. Blakers, A.W., and Green, M.A., "20% Efficiency Silicon Solar Cells," Appl. Phys. Lett., 48 (3), 215-217, 1986.

11. ยุทธนา กุลวิฑิต, "ระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์," รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2527.
12. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, "การศึกษาออกแบบระบบโฟโตโวลตาอิก," รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2527.
13. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, สุกิน เวทย์วัฒนะ, "เซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมแสง," รายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2525.
14. Sanderson, R.W., O'Donnell, D.T., and Backus, C.E., "The Effects of Nonuniform Illumination and Temperature Profiles on Silicon Solar Cells Under Concentrated SunLight," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 431-436, 1980.
15. L. Crook, D., and R. Yeamans, J., "Optimization of Silicon Solar Cell Design for Use Under Concentrated Sunlight," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-24, No.4, 330-336, 1977.
16. Lammert, M.D., and Schwartz, R.J., "The Interdigitated Back Contact Solar Cell: A Silicon Solar Cell for Use in Concentrated Sunlight," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-24, NO.4, 337-342, 1977.
17. Luque, A., Ruiz, J.M., and Cuevas, A., "A N^+PN^+ Double-Sided Solar Cell for Optimal Static Concentration," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 76-81, 1980.
18. Sola, G., Luque, A., Calleja, M.J., and Eguren, J., "Performance of an Albedo Collecting Bifacial Flat Module," Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 507-512, 1984.
19. Cuevas, A., Laque, A., Eguren, J., and Del Alamo, J., "50 Percent More Output Power From An Albedo Collecting Flat Panel Using Bifacial Solar Cells," Solar Energy, Vol. 29, No. 5, 419-420, 1982.

20. Luque, A., Ruiz, J.M., Cuevas, A., Eguren, J., Agost, M.G., "Double Sided (D.S.) Solar Cells to Improve Static Concentration," Records of 1st European Communities Photovoltaic Solar Energy Conf., 269-277, 1977.
21. Chambouleyron, I., and Chevalier, Y., "Silicon Double Solar Cell," Records of 1st European Communities Photovoltaic Solar Energy Conf., 967-976, 1977.
22. Luque, A., Cuevas, A., and Ruiz, J.M., "Double-Sided $n^+ - p - n^+$ Solar Cell for Bifacial Concentration," Solar Cells, 2, 151-166, 1980.
23. Sze, S.M., Semiconductor Devices Physics and Technology, John Wiley and Son, 1985.
24. S. Yang, E., Fundamental of Semiconductor Devices, 147-160, McGraw-Hill Book Co., New York, 1978.
25. บุญมาก ศิริเนาวกุล, "การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าโฟโตในเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็น," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.
26. Wolf, H.F., "Silicon Semiconductor Data," Hungary: Pergamon Press, 1969.
27. Thomas, R.E., "Silicon Solar Cell (1) - Basic," Solar Energy Conversion An Introduction Course, 785-803, Pergamon Press, 1978.
28. Hovel, H.J., Semiconductor Semimetals Vol 11 (A.C. Beer, R.K. Willardson), New York, Academic Press, 1975.
29. Redfield, D., "Unified Model of Fundamental Limitations on the Performance of Silicon Solar Cell," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-27, NO.4, 766-776, 1980.
30. Redfield, D., "Fundamental Limitations on Silicon Solar-Cell Efficiency," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 580-584, 1980.

31. Godlewski, M.P., Klucher, T.M., Mazaris, G.A., and Weizer, V.G., "Open-Circuit Voltage Improvement in Low Resistivity Solar Cells," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 166-171, 1980.
32. Hall, R.N., "Review Paper Silicon Photovoltaic Cells," Solid-State Electronics, Vol 24, 595-616, 1981.
33. Fossum, J.G., "Computer-Aided Numerical Analysis of Silicon Solar Cell," Solid-State Electronics, Vol 19, 269-277, 1976.
34. Lindholm, F.A., Fossum, J.G., and Burgess, E.L., "Application of The Superposition Principle to Solar Cell Analysis," IEEE Transactions on Electron Devices, ED-26, NO.3, 165-171, 1979.
35. ประมวล วงศ์ภูงา, สุกิน เวทย์วิวัฒนะ, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, "การศึกษาลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบหัวต่อพีเอ็น," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันอุดมศึกษาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2, หน้า 1-16-1 - 1-16-9, 2522.
36. สุกิน เวทย์วิวัฒนะ, "ความเกี่ยวข้องระหว่างลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพีเอ็น," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันอุดมศึกษาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2, หน้า 1-17-1 - 1-17-9, 2522.
37. Iowa State University Research Foundation (ISURF), "PC-1D INSTALLATION MANUAL AND USER'S GUIDE Version 1.1," Iowa State University, 1985.
38. ประคนเดช นิละคุปต์, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, "กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแสงส่องเข้าทางด้านหลัง," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันอุดมศึกษาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, หน้า 1.263-1.269, 2528.
39. ประคนเดช นิละคุปต์, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, "เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบพลานาร์," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันอุดมศึกษาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, หน้า 1.38, 2529.
40. Groove, A.S., Physics and Technology of Semiconductor Devices, 173-191, New York, John Wiley and Sons, 1967.

41. Suau, J.C., "Model Optoelectronique Pour La Conception de Piles Solaires a Semiconducteur," These A L'Universite PAUL SABATIGR de TOULOUSE du grade de Docteur de 3^e Cycle, 1977.
42. Wolf, M., "A New Look at Si Solar Cell Performance," Energy Conversion, Vol. 11, 63-73, 1971.
43. Iles, P.A., "A Survey of Grid Technology," Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 340-347, 1982.
44. Rajkanan, K., and Shewchun, J., "A Better Approach to The Evaluation of The Series Resistance of Solar Cells," Solid-State Electronics, Vol 22, 193-197, 1979.
45. บรรยาย โตประเสริฐวงศ์, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, "การทำผิวสัมผัส Ni/n-Si ให้เป็นแบบโอห์มมิกโดยเทคนิคการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันอุดมศึกษาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4, หน้า 3/3, 2524.
46. Deb, S., Maitra, K., and Roychoudhuri, A., "An Accurate and Simple Technique of Determination of The Maximum Power Point and Measurement of Some Solar Cell Parameter," IEE Proc., Vol. 132, pt.1, No. 3, 157-162, 1985.
47. Wolf, M., and Rauschenbach, H., "Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements," Advanced Energy Conversion, Vol. 3, 455-479, 1963.
48. K. Emery and J. DuBow, "Automated Electronic Analysis of Solar Cells," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 506-510, 1980.
49. Masden, G.W., "Determination of Silicon Cell Model Parameters Using A Least-Squares-Fit to Experiment Spectral Response and The I-V Curve," Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 495-500, 1982.
50. Warashina, M. and Ushirokawa, A., "Simple Method for the Determination of Series Resistance and Maximum Power of Solar Cell," Proc. 1st Photovoltaic Science and Engineering Conf. in Japan, 179-182, 1979.

51. Cape, J.A., and Zehr, S.W., "Effect of Temperature Variation in Concentrator Cell Series Resistance Measurements," Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 449-452, 1980.
52. Nielsen, L.D., "Distributed Series Resistance Effects in Solar Cells," IEEE Transaction on Electron Devices, ED-29, No.5, , 1982.
53. Meier, D.L., Campbell, R.B., Davis, J.R., Rai-Choudhury, P., and Sienkiewicz, L.J., "Solar Cell Contact," Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 904-910, 1982.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROGRAM SOLAR;

{ Version 2.0 }

{ Written by Mr. Pradodet Nilagupta }

{ 23 JUNE 1987 }

CONST

{ SOLAR SPECTRUM AM1 DATA }

LAMDA : ARRAY [1..21] OF REAL

= (0.30E-6,0.32E-6,0.36E-6,0.40E-6,0.44E-6,0.48E-6,0.52E-6,
0.56E-6,0.60E-6,0.64E-6,0.68E-6,0.72E-6,0.76E-6,0.80E-6,
0.84E-6,0.88E-6,0.92E-6,0.96E-6,1.00E-6,1.04E-6,1.08E-6);

PHOTON_FLUX : ARRAY [1..21] OF REAL

= (1.51E15,2.67E15,8.90E15,1.76E16,2.95E17,3.70E17,4.01E17,
4.09E17,4.22E17,4.19E17,4.21E17,4.02E17,3.28E17,3.89E17,
3.95E17,3.38E17,1.92E17,3.33E17,3.46E17,3.20E17,3.01E17);

ALPHA : ARRAY [1..21] OF REAL

= (7.21E5,4.44E5,1.62E5,7.36E4,3.34E4,1.89E4,1.00E4,6.59E3,
4.25E3,2.99E3,2.30E3,1.62E3,1.36E3,1.14E3,9.16E2,7.36E2,
5.41E2,3.81E2,2.46E2,1.00E2,3.00E1);

DATA_X1 : ARRAY [1..9] OF REAL

= (0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9);

Tnn : ARRAY [1..4] OF REAL

= (1E-8,1E-7,1E-6,10E-6);

Tpp : ARRAY [1..3] OF REAL

= (0.1E-6,1E-6,10E-6);

Snm : ARRAY [1..5] OF REAL

= (1E2,1E3,1E4,1E5,1E6);

Spp : ARRAY [1..4] OF REAL

= (10,1E2,1E3,1E4);

{ SOLAR CELL NUMERICAL DATA FOR SILICON AT 300 K UNDER AM1 CONDITION }

Nd : REAL = 5E19;

Na : REAL = 5E17;

Dp : REAL = 1.295;

Dn : REAL = 10.9;

Lp : REAL = 7.2E-4;

Ln : REAL = 52.2E-4;

Tp : REAL = 0.4E-6;

Tn : REAL = 2.5E-6;


```

W :REAL = 0.05E-4;    DELTA :REAL = 1E-5;
Vd :REAL = 1.022;    X3 :REAL = 300.0E-4;
Sp :REAL = 1E4;      MILIAMP :REAL = 1E3;
Sn :REAL = 1E6;
TABLE_SPEC = 21;
Q :REAL = 1.6E-19;
THICK = 50; { 500 uM}

```

TYPE

```
A = ARRAY [1..TABLE_SPEC] OF REAL;
```

VAR

```

II,J,I : INTEGER;
R,R1 : REAL; { REFLECTION COEFFICIENT }
X1,X2 : REAL; { DEPTH }
JP,JN,JDR : A; { CURRENT DENSITY }
STEP_H,H : REAL;
FIL : TEXT;
FI : STRING[12];
CH1 : STRING[1];
Lpp,Lnn : REAL;
JPH : ARRAY[1..50,1..5] OF REAL;
C1,C2 : INTEGER;
X11,JPH1,JNH1,JDH1 : ARRAY[1..50] OF REAL;
Dnn,Dpp : REAL;

```

```
FUNCTION COSH(X :REAL):REAL;
```

```
BEGIN
```

```
  COSH := (EXP(X)+EXP(-X))/2.0;
```

```
END;
```

```
FUNCTION SINH(X :REAL):REAL;
```

```
BEGIN
```

```
  SINH := (EXP(X)-EXP(-X))/2.0;
```

```
END;
```

```
{ FUNCTION Jp CURRENT DENSITY }
```

```
FUNCTION JP1(ALPHA1,PFLUX1,Dp1,R1,Lp1,Sp1,X1,T1,R2 :REAL):REAL ;
```

```
VAR
```

```

J1,J2,J3,XJ,XY,RR,
XY1,XY2      : REAL;
BEGIN
  RR := (1-R2)/(1-R1);
  XY := -ALPHA1*X1;
  XY1 := -ALPHA1*T1;
  XY2 := -ALPHA1*(T1-X1);
  IF XY<-709 THEN XY := -709;
  IF XY1<-600 THEN XY1 := -600;
  IF XY2<-600 THEN XY2 := -600;
  XJ := X1/Lp1;
  J1 := Q*PFLUX1*(1-R1)*ALPHA1*Lp1/(SQR(ALPHA1)*SQR(Lp1)-1);
  J2 := J1*(((Sp1*Lp1/Dp1)+ALPHA1*Lp1-EXP(XY))*(Sp1*Lp1/Dp1+COSH(XJ)+SINH(XJ)))/
      (Sp1*Lp1/Dp1*SINH(XJ)+COSH(XJ))-ALPHA1*Lp1*EXP(XY);
  J3 := J1*RR*(((Sp1*Lp1/Dp1-ALPHA1*Lp1)*EXP(XY1)-EXP(XY2))*(Sp1*Lp1/Dp1+COSH(XJ)
      +SINH(XJ)))/(Sp1*Lp1/Dp1*SINH(XJ)+COSH(XJ))+ALPHA1*Lp1*EXP(XY2));
  JP1 := J2+J3;
END;

{ FUNCTION Jn CURRENT DENSITY }

FUNCTION JN1(ALPHA2,PFLUX2,Dn2,R1,Ln2,Sn2,XX,X2,R2 :REAL):REAL ;
VAR
  J1,J2,J3,XJ,XY,XY1,RR : REAL;
BEGIN
  RR := (1-R2)/(1-R1);
  XJ := XX/Ln2;
  XY := -ALPHA2*XX;
  XY1 := -ALPHA2*X2;
  IF XY<-600 THEN XY := -600;
  IF XY1<-600 THEN XY1 := -600;
  J1 := Q*PFLUX2*(1-R1)*ALPHA2*Ln2/(SQR(ALPHA2)*SQR(Ln2)-1)*EXP(XY1);
  J2 := ALPHA2*Ln2-(Sn2*Ln2/Dn2*(COSH(XJ)-EXP(XY))+SINH(XJ)+ALPHA2*Ln2*
      EXP(XY))/(Sn2*Ln2/Dn2*SINH(XJ)+COSH(XJ));
  J3 := J1*RR*(((Sn2*Ln2/Dn2+ALPHA2*Ln2)-EXP(XY))*(Sn2*Ln2/Dn2+COSH(XJ)+SINH(XJ)))/
      (Sn2*Ln2/Dn2*SINH(XJ)+COSH(XJ))-ALPHA2*Ln2*EXP(XY);
  JN1 := J1+J2+J3;
END;

```

```

FUNCTION JDR1(VAR ALPHA3,PFLUX3,R1,X1,W1,X3,R2 :REAL) : REAL;
CONST
  Q :REAL = 1.6E-19;
VAR
  XY,XY1 :REAL;
BEGIN
  XY := -ALPHA3*X1;
  XY1 := -ALPHA3*(X3-X1);
  IF XY<-709 THEN XY := -709;
  IF XY1 <-600 THEN XY1 := -600;
  JDR1 := Q*PFLUX3*((1-R1)*EXP(XY)*(1-EXP(-ALPHA3*W1))
    +(1-R2)*EXP(XY1)*(EXP(ALPHA3*W1)-1));
END;

{ SIMSON 'S RULES INTEGRATION }

FUNCTION SIMSON(VAR CURRDEN :A; SPEC : INTEGER; STEP_SIZE : REAL): REAL;
VAR
  RESULT,XY : REAL;
  I : INTEGER;
BEGIN
  RESULT := 0;
  XY := 0;
  FOR I := 2 TO SPEC-1 DO
  BEGIN
    CASE I MOD 2 OF
      0 : RESULT := CURRDEN[I]*4.0;
      1 : RESULT := CURRDEN[I]*2.0;
    END;
    XY := XY +RESULT;
  END;
  SIMSON := STEP_SIZE/3.0*(CURRDEN[1] + XY + CURRDEN[SPEC]);
END;

FUNCTION EX(I :INTEGER): REAL;
VAR
  J : INTEGER;
  M : REAL;

```

```

BEGIN
  M := 1;
  FOR J := 1 TO I DO
    BEGIN
      M := M*10;
    END;
  EX := M;
END;

{ CALCULATION }

PROCEDURE CAL(Sp, So, Tp, To, Ln, Lp : REAL);
BEGIN
  C1 := 1;
  FOR II := 1 TO 2 DO
    BEGIN
      FOR J := 1 TO 9 DO
        BEGIN
          GOTOXY(50,2); WRITE('ANALYZE ',C2:2,' ',C1:2);
          X1 := DATA_X1[J]*EX(II)*1E-5 ;
          STEP_H := (LAMDA[3]-LAMDA[2])*1E6;
          X2 := X1+W;
          H := X3-X2;
          FOR I := 1 TO TABLE_SPEC DO
            BEGIN
              JP[I] := JP1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],Dp,R,Lp,Sp,X1,X3,R1);
              JN[I] := JN1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],Dn,R,Ln,So,H,X2,R1);
              JDR[I] := JDR1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],R,X1,W,X3,R1);
            END;
            JPH1[C1] := SIMSON(JP, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
            JNH1[C1] := SIMSON(JN, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
            JDH1[C1] := SIMSON(JDR, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
            JPH[C1, C2] := JPH1[C1]+JNH1[C1]+JDH1[C1];
            X11[C1] := X1*1E4;
            C1 := C1+1;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;

```

```

WRITELN;
CLESCR;
END;

```

```

PROCEDURE MENU;

```

```

BEGIN

```

```

    CLESCR;

```

```

    GOTOXY(30,5); WRITELN('    MENU ');

```

```

    WRITELN;

```

```

    GOTOXY(30,8); WRITELN(' 1. Sp IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,9); WRITELN(' 2. Sn IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,10); WRITELN(' 3. Tn IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,11); WRITELN(' 4. Tp IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,12); WRITELN(' 5. Xj IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,13); WRITELN(' 6. THICKNESS IS VARIABLE. ');

```

```

    GOTOXY(30,15); WRITE(' SELECT CHOICE ');

```

```

    READLN(CH1);

```

```

END;

```

```

PROCEDURE CHOICE_1;

```

```

VAR

```

```

    I : INTEGER;

```

```

BEGIN

```

```

    FOR I := 1 TO 4 DO

```

```

        BEGIN

```

```

            C2 := I;

```

```

            CAL(Spp[I], Sn, Tp, Tn, Ln, Lp);

```

```

        END;

```

```

    FOR I := 1 TO C1-1 DO

```

```

        BEGIN

```

```

            WRITELN(X11[I]:10:4, JPH[I,1]:10:4, JPH[I,2]:10:4, JPH[I,3]:10:4,

```

```

            JPH[I,4]:10:4);

```

```

            WRITELN(FIL, X11[I]:10:4, JPH[I,1]:10:4, JPH[I,2]:10:4, JPH[I,3]:10:4,

```

```

            JPH[I,4]:10:4);

```

```

        END;

```

```

END;

```

```

PROCEDURE CHOICE_2;
VAR
  I : INTEGER;
BEGIN
  FOR I := 1 TO 5 DO
    BEGIN
      C2 := I;
      CAL(Sp, Snn[I], Tp, Tn, Ln, Lp);
    END;
  FOR I := 1 TO C1-1 DO
    BEGIN
      WRITELN(X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4,
        JPH[I, 4]:10:4, JPH[I, 5]:10:4);
      WRITELN(FIL, X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4,
        JPH[I, 4]:10:4, JPH[I, 5]:10:4);
    END;
  END;

PROCEDURE CHOICE_3;
VAR
  I : INTEGER;
BEGIN
  FOR I := 1 TO 4 DO
    BEGIN
      Lnn := SQRT(Dn*Tnn[I]);
      C2 := I;
      CAL(Sp, So, Tp, Tnn[I], Lnn, Lp);
    END;
  FOR I := 1 TO C1-1 DO
    BEGIN
      WRITELN(X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4, JPH[I, 4]:10:4);
      WRITELN(FIL, X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4, JPH[I, 4]:10:4);
    END;
  END;

PROCEDURE CHOICE_4;

```

```

VAR
  I : INTEGER;
BEGIN
  FOR I := 1 TO 3 DO
    BEGIN
      Lpp := SQRT(Dp*Tpp[I]);
      C2 := I;
      CAL(Sp, Sa, Tpp[I], Tn, Ln, Lpp);
    END;
  FOR I := 1 TO C1-1 DO
    BEGIN
      WRITELN(X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4);
      WRITELN(FIL, X11[I]:10:4, JPH[I, 1]:10:4, JPH[I, 2]:10:4, JPH[I, 3]:10:4);
    END;
  END;

```

```

PROCEDURE CHOICE_5;

```

```

VAR
  I : INTEGER;
BEGIN
  C2 := 1;
  CAL(Sp, Sa, Tp, Tn, Ln, Lp);
  WRITELN('          JP      JN      JDR      JPH ');
  WRITELN(FIL, '          JP      JN      JDR      JPH ');
  FOR I := 1 TO C1-1 DO
    BEGIN
      WRITELN('X = ', X11[I]:10:4, ' um ', JPH1[I]:10:4, JNH1[I]:10:4,
        JDB1[I]:10:4, JPH[I, C2]:10:4, ' mA ');
      WRITELN(FIL, 'X = ', X11[I]:10:4, ' um ', JPH1[I]:10:4, JNH1[I]:10:4,
        JDB1[I]:10:4, JPH[I, C2]:10:4, ' mA ');
    END;
  END;

```

```

PROCEDURE CHOICE_6;

```

```

VAR
  I, J : INTEGER;
  X3 : REAL; { THICKNESS }

```

```

BEGIN
  C2 := 1;
  C1 := 1;
  X1 := 1E-5;
  STEP_H := (LAMDA[3]-LAMDA[2])*1E6;
  X2 := X1+W;
  FOR J := 1 TO THICK DO
    BEGIN
      GOTOXY(50,2); WRITE('ANALYZE ',C2-2,' ',C1-2);
      X3 := J*10*1E-4;
      H := X3-X2;
      FOR I := 1 TO TABLE_SPEC DO
        BEGIN
          JP[I] := JP1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],Dp,R,Lp,Sp,X1,X3,R1);
          JN[I] := JN1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],Dn,R,Ln,Sn,H,X2,R1);
          JDR[I] := JDR1(ALPHA[I],PHOTON_FLUX[I],R,X1,W,X3,R1);
          END;
          JPH1[C1] := SIMSON(JP, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
          JNH1[C1] := SIMSON(JN, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
          JDH1[C1] := SIMSON(JDR, TABLE_SPEC, STEP_H)*MILIAMP;
          JPH[C1,C2] := JPH1[C1]+JNH1[C1]+JDH1[C1];
          X11[C1] := X3*1E4;
          C1 := C1+1;
        END;
      WRITELN('          JP      JN      JDR      JPH ');
      WRITELN(FIL,'          JP      JN      JDR      JPH ');
      FOR I := 1 TO C1-1 DO
        BEGIN
          WRITELN('X = ',X11[I]:10:4,' um ',JPH1[I]:10:4,JNH1[I]:10:4,
            JDH1[I]:10:4,JPH[I,C2]:10:4,' mA ');
          WRITELN(FIL,'X = ',X11[I]:10:4,' um ',JPH1[I]:10:4,JNH1[I]:10:4,
            JDH1[I]:10:4,JPH[I,C2]:10:4,' mA ');
        END;
      END;
    END;
  { MAIN PROGRAM }

```



```
BEGIN
  MENU;
  WRITE('INPUT REFLECTION COEFFICIENT R = ');
  READLN(R);
  WRITE('INPUT BACK REFLECTION COEFFICIENT R1 = ');
  READLN(R1);
  WRITE('OUTPUT FILE ');
  READLN(FI);
  ASSIGN(FIL, '\pdet\picture\'+FI);
  REWRITE(FIL);
  CLRSCR;

  CASE CH1 OF
    '1' : CHOICE_1;
    '2' : CHOICE_2;
    '3' : CHOICE_3;
    '4' : CHOICE_4;
    '5' : CHOICE_5;
    '6' : CHOICE_6;
  END;
  CLOSE(FIL);
END.
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน n^+

โดยเริ่มจากการใช้ continuity equation

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} (p_n - p_{no}) + G(x) - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} = 0 \quad (\text{ข.1})$$

$$G(x) = \alpha F_1 (1-R_1) \exp(-\alpha x) + \alpha F_2 (1-R_2) \exp(-\alpha(H-x))$$

$$\text{ให้ } F_1 = F_2 = F_0$$

$$\text{และ } R = \frac{1-R_2}{1-R_1}$$

จะได้ว่า

$$G(x) = \alpha F_0 (1-R_1) [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

จากสมการ (ข.1) จะได้ว่า

$$\frac{d^2}{dx^2} [p_n - p_{no}] - \frac{(p_n - p_{no})}{L_p^2} = -\alpha F_0 \frac{(1-R_1)}{D_p} [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

จะได้ solution คือ

$$p_n - p_{no} = A \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha F_0 (1-R_1)}{D_p (\alpha^2 - 1/L_p^2)} [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

$$\text{ให้ } \frac{\alpha F_0 (1-R_1)}{D_p (\alpha^2 - 1/L_p^2)} = k$$

$$p_n - p_{no} = A \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - k [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))] \quad (\text{ข.2})$$

จาก boundary condition จะได้ว่า

$$D_p \frac{d}{dx} (p_n - p_{no}) = S_p (p_n - p_{no}) \quad |x = 0|$$

$$\text{และ } p_n - p_{no} = 0 \quad |x = x_j|$$

แทนค่า Boundary conditron ลงใน (ข.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} D_p \frac{d}{dx} (p_n - p_{no}) \Big|_{x=0} &= \frac{D_p B}{L_p} + k \alpha D_p (1 - R \exp(-\alpha H)) \\ &= S_p A - S_p k (1 + R \exp(-\alpha H)) \\ S_p A - \frac{D_p B}{L_p} &= D_p k \alpha (1 - R \exp(-\alpha H)) + S_p k (1 + R \exp(-\alpha H)) \quad (\text{ข.3}) \\ &= M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) &= k \left[\exp(-\alpha x_j) + R \exp(-\alpha(H - x_j)) \right] \\ &= N \quad (\text{ข.4}) \end{aligned}$$

จากสมการ (ข.3) และ (ข.4) จะได้

$$A = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{M \sinh(x_j/L_p) + \frac{D_p}{L_p} N}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right] \quad (\text{ข.5})$$

$$B = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{S_p N - M \cosh(x_j/L_p)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right] \quad (\text{ข.6})$$

$$\text{ให้ } Z = \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)$$

$$A = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{M \sinh(x_j/L_p) + \frac{D_p}{L_p} N}{Z} \right] \quad (\text{ข.7})$$

$$B = \frac{L_p}{D_p} \left[\frac{S N - M \cosh(x_j/L_p)}{Z} \right] \quad (v.6)$$

$$\text{จาก } J_p \Big|_{x=x_j} = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \Big|_{x=x_j}$$

แทนค่าลงใน (ข. 2) จะได้

$$\begin{aligned} J_p &= -qD_p \left[\frac{A}{L_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \frac{B}{L_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + k\alpha(\exp(-\alpha x_j) - R \exp(-\alpha(H-x_j))) \right] \\ &= -qD_p \left[\frac{-\frac{M}{D} + N\left(\frac{1}{L} \sinh(x_j/L_p) + \frac{S}{D} \cosh(x_j/L_p)\right) + k\alpha(\exp(-\alpha x_j))}{Z} \right. \\ &\quad \left. - R \exp(-\alpha(H-x_j)) \right] \\ &= -qD_p \left[\frac{-k\alpha(1-R \exp(-\alpha H)) - \frac{S}{D} k(1+R \exp(-\alpha H)) +}{\frac{S L}{D P} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right. \\ &\quad \left. \frac{k(\exp(-\alpha x_j) + R \exp(-\alpha(H-x_j))) \left(\frac{1}{L} \sinh(x_j/L_p) + \frac{S}{L} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)\right)}{\frac{S L}{D P} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right. \\ &\quad \left. + k\alpha(\exp(-\alpha x_j) - R \exp(-\alpha(H-x_j))) \right] \\ J_p &= \frac{q\alpha F_o (1-R_1) L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[\frac{\alpha L_p (1-R \exp(-\alpha H)) + \frac{S L}{D P} (1+R \exp(-\alpha H))}{\frac{S L}{D P} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{-(\exp(-\alpha x_j) + R \exp(-\alpha(H-x_j))) \left(\sinh(x_j/L_p) + \frac{S L_p}{D_p} \cosh(x_j/L_p) \right)}{\frac{S L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \\
 & \left. -\alpha L_p (\exp(-\alpha x_j) - R \exp(-\alpha(H-x_j))) \right] \\
 J_{p1} = & \frac{q\alpha F_o (1-R_1) L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[\frac{\frac{S L_p}{D_p} + \alpha L_p}{\frac{S L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} - \exp(-\alpha x_j) \left(\sinh(x_j/L_p) + \frac{S L_p}{D_p} \cosh(x_j/L_p) \right) \right. \\
 & \left. -\alpha L_p \exp(-\alpha x_j) \right] \\
 J_{p2} = & \frac{q\alpha F_o (1-R_1) L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \left[\frac{\left(\frac{S L_p}{D_p} - \alpha L_p \right) R \exp(-\alpha H) - R \exp(-\alpha(H-x_j)) \left(\sinh(x_j/L_p) + \frac{S L_p}{D_p} \cosh(x_j/L_p) \right)}{\frac{S L_p}{D_p} \sinh(x_j/L_p) + \cosh(x_j/L_p)} \right. \\
 & \left. \cosh(x_j/L_p) + \alpha L_p R \exp(-\alpha(H-x_j)) \right]
 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่าน p^+

โดยเริ่มจากการใช้ continuity equation

$$D_n \frac{d^2}{dx^2} [n_p - n_{po}] + G(x) - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} = 0 \quad (\text{ข.9})$$

$$G(x) = \alpha F_0 (1-R_1) [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

จากสมการที่ (ข.9) จะได้ว่า

$$\frac{d^2}{dx^2} [n_p - n_{po}] - \frac{n_p - n_{po}}{L_n^2} = \frac{-\alpha F_0 (1-R_1)}{D_n} [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

จะได้ solution คือ

$$n_p - n_{po} = A \cosh(x/L_n) + B \sinh(x/L_n) - \frac{\alpha F_0 (1-R_1)}{D_n (\alpha^2 - 1/L_n^2)} [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))]$$

$$\text{ให้ } k = \frac{\alpha F_0 (1-R_1)}{D_n (\alpha^2 - 1/L_n^2)}$$

$$\therefore n_p - n_{po} = A \cosh(x/L_n) + B \sinh(x/L_n) - k [\exp(-\alpha x) + R \exp(-\alpha(H-x))] \quad (\text{ข.10})$$

จาก boundary condition จะได้ว่า

$$D_n \frac{d}{dx} (n_p - n_{po}) = -S_n (n_p - n_{po}) \quad |x = H|$$

$$\text{และ } n_p - n_{po} = 0 \quad |x = x_j + w|$$

แทนค่า boundary condition ลงใน (ข.10) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 D_n \frac{d}{dx} (n_p - n_{p0}) \Big|_{x=H} &= \frac{D_n}{L_n} A \sinh (H/L_n) + \frac{D_n}{L_n} B \cosh (H/L_n) + k\alpha D_n [\exp(-\alpha H) - R] \\
 &= -S_n A \cosh(H/L_n) - S_n B \sinh(H/L_n) + S_n k [\exp(-\alpha H) + R] \\
 \left[S_n \cosh (H/L_n) + \frac{D_n}{L_n} \sinh (H/L_n) \right] A + \left[S_n \sinh (H/L_n) + \frac{D_n}{L_n} \cosh (H/L_n) \right] B \\
 &= (S_n - \alpha D_n) k \exp(-\alpha H) + (S_n + \alpha D_n) k R \\
 &= I \tag{ข.11}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A \cosh ((x_j + w)/L_n) + B \sinh ((x_j + w)/L_n) &= k [\exp(-\alpha(x_j + w)) + R \exp(-\alpha(H - x_j - w))] \\
 &= J \tag{ข.12}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ข. 11) และ (ข. 12)

$$A = \frac{L_n}{D_n} \left[\frac{J(S_n \sinh (H/L_n) + \frac{D_n}{L_n} \cosh (H/L_n)) - I \sinh ((x_j + w)/L_n)}{Z} \right] \tag{ข.13}$$

$$B = \frac{L_n}{D_n} \left[\frac{I \cosh ((x_j + w)/L_n) - J (\frac{D_n}{L_n} \sinh (H/L_n) + S_n \cosh (H/L_n))}{Z} \right] \tag{ข.14}$$

$$\text{ให้ } Z = \frac{S_n L_n}{D_n} \sinh (H'/L_n) + \cosh (H'/L_n)$$

$$H' = H - (x_j + w)$$

แทนค่า (ข.13) และ (ข.14) ลงใน (ข.15) จะได้

$$\begin{aligned}
 J_n &= qD_n \left[\frac{A}{L_n} \sinh \left(\frac{(x_j + w)}{L_n} \right) + \frac{B}{L_n} \cosh \left(\frac{(x_j + w)}{L_n} \right) + k\alpha \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - R \exp(-\alpha H') \right] \right] \\
 &= qD_n \left[\frac{1}{ZD_n} \left[I - J \left[\frac{D_n}{L_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + S_n \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right) \right] \right] + k\alpha \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - R \exp(-\alpha H') \right] \right] \\
 &= qD_n \left[\frac{1}{ZD_n} \left[(S_n - \alpha D_n) k \exp(-\alpha H) + (S_n + \alpha D_n) R k - k \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + R \exp(-\alpha H') \right] \left[\frac{D_n}{L_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + S_n \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right) \right] \right] + k\alpha \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \\
 &\quad \left. \left. - R \exp(-\alpha H') \right] \right] \\
 J_n &= \frac{qF_o (1 - R_1) \alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \left[\frac{L_n}{D_n} \left[\frac{(S_n - \alpha D_n) \exp(-\alpha H) + (S_n + \alpha D_n) R - \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. \frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right) \right]}{\frac{D_n}{L_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + S_n \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right)} \right] \right. \\
 &\quad \left. + \alpha L_n \left[\exp(-\alpha(x_j + w)) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - R \exp(-\alpha H') \right] \right] \\
 J_{n1} &= \frac{qF_o (1 - R) \alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} \exp(-\alpha(x_j + w)) \left[\alpha L_n - \frac{S_n L_n}{D_n} \frac{(\cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right) - \exp(-\alpha H'))}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right)} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \left(\frac{H'}{L_n} \right) + \cosh \left(\frac{H'}{L_n} \right)} \right]
 \end{aligned}$$

$$J_{n2} = \frac{qF_o (1 - R) \alpha L_n \exp(-\alpha(x_j + w))}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} R \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n\right) \exp(-\alpha H') \left[\frac{S_n L_n}{D_n} \cosh(H'/L_n) + \sinh(H'/L_n)\right] - \alpha L_n \exp(-\alpha H')}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh(H'/L_n) + \cosh(H'/L_n)} \right]$$

$$J_n = J_{n1} + J_{n2}$$

การหาค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตในย่านปลดพาหะ

$$\begin{aligned} I_{dr} &= \int_{x_j}^{x_j + w} q\alpha F_o (1 - R_1) \exp(-\alpha x) dx + \int_{H - (x_j + w)}^{H - x_j} q\alpha F_o (1 - R_2) \exp(-\alpha x) dx \\ &= qF_o (1 - R_1) \exp(-\alpha x_j) (1 - \exp(-\alpha w)) + qF_o (1 - R_2) \exp(-\alpha(H - x_j)) (\exp(\alpha w) - 1) \\ &= qF_o \left[(1 - R_1) \exp(-\alpha x_j) (1 - \exp(-\alpha w)) + (1 - R_2) \exp(-\alpha(H - x_j)) (\exp(\alpha w) - 1) \right] \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การขัดผิวซิลิคอนชนิดขัดหยาบ

สารเคมีที่ใช้ในการขัดผิวได้แก่

HNO ₃ (fuming)	210	ml
CH ₃ COOH	140	ml
DI Water	40	ml
HF (50%)	30	ml

วิธีการขัดผิวมีขั้นตอนดังนี้คือ

1. ล้างแวนผลึกด้วย Trichloroethylene, Acetone, DI Water
2. เป่าแห้งด้วย N₂
3. นำแวนผลึกวางบนที่จับแวนผลึกในรูปที่ 4.27 แล้วนำไปติดกับเครื่องมือสำหรับ

ขัดผิวแวนผลึก

4. นำไปจุ่มในสารเคมีที่เตรียมไว้ กวนในสารเคมีนาน 5 นาที หลังจากนั้นนำไปกวนใน DI Water นาน 1 นาที
5. จุ่มใน DI Water แล้ว rinse ด้วย DI Water พอประมาณ เป่าแห้งด้วย N₂
6. กลับแวนผลึกทางด้านหลังให้มาอยู่ทางด้านหน้า แล้วย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 3-5

หลังจากขัดผิวเสร็จแล้วแวนผลึกจะมีความหนาประมาณ 200 μm . (สำหรับแวนผลึกที่มีความหนาเริ่มต้นประมาณ 250 μm .) ข้อควรระวังสำหรับการขัดผิวคือสารเคมีที่ใช้ควรเตรียมใหม่ ถ้าเก่าเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการขัดผิวนานขึ้นและอาจทำให้เกิดรอยด่างขึ้นบริเวณด้านหลัง สารเคมีที่เตรียมใน 1 ครั้งสามารถขัดผิวได้ประมาณ 20 แผ่น และไม่ควรถังไว้เกิน 2 สัปดาห์

ภาคผนวก ง

การทำ Final Cleaning

1. นำแว่นผลึกล้างใน Trichloroethylene เดือด 5 นาที
2. เสร์จล้างใน Acetone เดือด 10 นาที
3. เสร์จล้างใน DI Water เดือด 5 นาที
4. นำแว่นผลึกจุ่มใน HNO₃ เดือด 10 นาที
5. นำแว่นผลึกจุ่มใน DI Water เดือด 5 นาที
6. เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂
7. นำแว่นผลึกจุ่มใน HF นาน 2-3 นาทีเป็นอย่างมาก
8. นำแว่นผลึกจุ่มใน DI Water เดือด 5 นาที
9. เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂

หมายเหตุก่อนทำ Final Cleaning ควรล้างแว่นผลึกด้วย Trichloroethylene, Acetone, DI Water ด้วยเครื่อง Ultrasonic เสียก่อน

การทำ Oxidation

การปลูกชั้นออกไซด์บางบนแว่นผลึกซิลิคอนเป็นลักษณะพื้นฐานของเทคโนโลยีแบบพลาสมา และมักทำที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ทำเป็นแบบ Wet Oxidation คือ



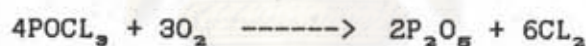
ขั้นตอนการทำ Wet Oxidation มีดังนี้คือ

1. ปลอ่ยก๊าซนำ (Carrier Gas) ซึ่งได้แก่ N₂ ด้วยปริมาณ 1 ลิตร/นาที

2. วางแวน์ผลึกไว้ที่ปากเตานานประมาณ 5 นาทีเพื่อให้แวน์ผลึกปรับตัวเอง
3. จากนั้นค่อยๆ เลื่อนภาชนะที่ใส่แวน์ผลึกไปไว้ที่กลางเตาแล้วจึงปล่อยก๊าซ O_2 Buble ผ่าน DI Water (อุณหภูมิ $95^\circ C$) ด้วยปริมาณ 1 ลิตร/นาที นาน 2 ชม. 30 นาที หรือมากกว่านั้น อุณหภูมิของเตา $1000^\circ C$
4. หลังจากนั้นหยุดปล่อยก๊าซ O_2 แล้วค่อยๆ เลื่อนภาชนะใส่แวน์ผลึกมาวางไว้ที่ปากเตาอีกนาน 5 นาที จึงนำออกจากเตา

การแพร่ซึมสารเจือปน $POCl_3$

กระบวนการแพร่ซึมฝากฟอสฟอรัสที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำนี้เป็นแบบเตาแพร่ซึมเปิด (Open tube diffusion furnace) แหล่งสารเจือปนที่ใช้คือ $POCl_3$ ซึ่งเป็นของเหลว และจะใช้ก๊าซ N_2 Buble ผ่าน $POCl_3$ เพื่อนำเอาโมเลกุลของสารเจือปนเข้าไปในเตาแพร่ซึมโดยมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



ขั้นตอนการแพร่ซึมสารเจือปนมีดังนี้

1. ปล่อยก๊าซนำ (Carrier Gas) ได้แก่ N_2 และ O_2 ด้วยอัตรา 1.19 ลิตร/นาที และ 0.2 ลิตร/นาที
2. วางแวน์ผลึกไว้ที่ปากเตานานประมาณ 5 นาทีเพื่อให้แวน์ผลึกปรับตัวเอง
3. จากนั้นค่อยๆ เลื่อนภาชนะที่ใส่แวน์ผลึกมาไว้ที่กลางเตานาน 5 นาที (อุณหภูมิประมาณ $1000^\circ C$)
4. หลังจากนั้นปล่อยก๊าซ N_2 โดย Buble ผ่าน $POCl_3$ ด้วยอัตรา 0.47 ลิตร/นาที เข้าเตาทิ้งไว้เวลานาน 10 นาที กระเปาะที่ใส่ $POCl_3$ นำไปแช่ในน้ำแข็งขณะที่ทำงานอยู่ตลอดเวลา
5. หยุดปล่อยก๊าซ N_2 ที่ Buble ผ่าน $POCl_3$ โดยที่ยังคงปล่อยก๊าซนำต่อไปที่ผลึกไว้ที่กลางเตานาน 5 นาที

6. หลังจากนี้ค่อยๆ เลื่อนเกดที่ใส่แว่นผลึกมาวางไว้ที่ปากเตานาน 5 นาที แล้ว
จึงนำออกจากเตา

หมายเหตุในขั้นตอนที่ 4 นี้ระยะเวลาในการปล่อยก๊าซ N_2 จะเป็นตัวกำหนด
ความลึกของหัวตอดังแสดงไว้ในตารางที่ ง.1 [30]

ตารางที่ ง.1

C_B cm^3	P $\Omega-cm$	เวลาที่ใช้ในการแพร่ซึมฝาก					
		$X_j = 0.3 \text{ } \mu m$		$X_j = 0.4 \text{ } \mu m$		$X_j = 0.5 \text{ } \mu m$	
		นาที	วินาที	นาที	วินาที	นาที	วินาที
1×10^{15}	12	3	20	5	40	8	35
1.5×10^{15}	8.9	3	25	5	50	8	50
2.5×10^{15}	5	3	35	6	05	9	05
5×10^{15}	3	3	45	6	20	9	35
7×10^{15}	2	3	50	6	30	9	45
1×10^{16}	1.5	3	55	6	40	9	55
1.5×10^{16}	1	4	-	6	50	10	15
4×10^{16}	0.5	4	15	7	15	11	-
1×10^{17}	0.25	4	30	7	40	11	45
5×10^{17}	0.1	5	25	8	55	14	-

การทำ Photolithography

เป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากฟิล์มหรือแผ่นกระจกลงสู่แว่นผลึกโดยอาศัยน้ำยาไวแสงที่เรียกว่า Photoresist ซึ่งจะไวต่อแสงอุลตราไวโอเล็ต ในที่นี้ใช้น้ำยาของ Shipley รุ่น AZ1350

ขั้นตอนการทำ Photolithography มีดังนี้คือ

1. อบแว่นผลึกในเตาอุณหภูมิ 120 °C นาน 30 นาที
2. หยอดน้ำยาไวแสงแบบบวกลงบนแว่นผลึกและหมุนด้วยความเร็ว 5000 - 6000 รอบ/นาที นาน 20 วินาที (ตามมาตรวัดบนตัวเครื่องปั่น)
3. นำไปอบแห้งในเตาอุณหภูมิ 80 °C นาน 5 นาที สำหรับ SC2AA แต่ถ้าเป็น CSC ให้อบนาน 15 นาทีแล้วข้ามขั้นตอนที่ 4 และ 5
4. ทำขั้นตอนที่ 2 อีกทีที่ด้านหลังสำหรับ SC2AA
5. นำไปอบแห้งในเตาอุณหภูมิ 80 °C นาน 15 นาที แล้วจึงนำออกจากเตา
6. จากนั้นนำมาถ่ายแบบโดยฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตนาน 20 วินาที ถ้าเป็น SC2AA ให้ทำซ้ำอีกด้านหนึ่ง
7. Develop ด้วยน้ำยาเคมีที่ละลายสารไวแสงนาน 30 วินาที และล้างให้สะอาดด้วย DI Water เป่าแห้งด้วย N_2
8. อบแห้งในเตาอุณหภูมิ 120 °C นาน 30 นาที
9. กัดชั้นออกไซด์ด้วยน้ำยาเคมี
10. ล้างให้สะอาดด้วย DI Water และเป่าแห้งด้วย N_2
11. ล้างน้ำยาไวแสงที่เหลือออกให้หมดด้วย Acetone
12. ทำเหมือนขั้นตอนที่ 10

สำหรับการทำ Photolithography เพื่อที่จะทำขั้วโลหะนั้นให้ข้ามขั้นตอนที่ 8 ไป มิฉะนั้นน้ำยาไวแสงจะแข็งตัวเกินไป เทคนิคพิเศษที่ใช้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็กกว่าที่จับแว่นผลึกคือต้องหาแผ่นยางเจาะรูกลมตรงกลางเพื่อให้ Vacuum ดูด เป็นการป้องกันการทำการเคลือบน้ำยาไวแสงข้างหน้าแล้วข้างหลังจะเปื้อน

การทำขึ้นด้านการสะท้อนแสง (Antireflection Coating)

ทำเช่นเดียวกับการทำ Oxidation แต่ใช้เวลาที่วางไว้ในเตาน้อยกว่าคือ ใช้เวลาที่อยู่กลางเตาประมาณ 8 - 10 นาที ซึ่งจะได้ออกไซด์หนาประมาณ 800 - 1000 Å

การฉาบไอโลหะ (Metallization)

เป็นการทำผิวโลหะให้แก๊สประดิษฐ์ที่สร้างขึ้น ในที่นี้ใช้อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ใช้ในการฉาบไอโลหะ เทคนิคที่ใช้ในการทำ Metallization ได้แก่ การฉาบไอโลหะภายใต้สูญญากาศ (Vacuum Evaporation) เงื่อนไขที่ใช้ทำคือ ทำให้ภายใน Chamber มีสภาพเป็นสูญญากาศความดันประมาณ 10^{-6} Torr ความหนาของชั้นโลหะประมาณ 3000 - 5000 Å

การชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า

การสร้างผิวสัมผัสโลหะโดยวิธีชุบแบบไร้ไฟฟ้านี้ เป็นวิธีที่ใช้ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์ ในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โลหะที่ใช้ชุบได้แก่ นิกเกิล ซึ่งเป็นโลหะที่มีเสถียรภาพดีและบัดกรีตะกั่วได้ น้ำยาชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้านี้ ได้แก่ สารละลายของ นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) แอมโมเนียมซีเตรท ($(\text{NH}_4)_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7$) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) และโซเดียมไฮโปไฟอสไฟต์ ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เพื่อปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าอยู่ระหว่าง 8-10 สารละลายจะมีสีน้ำเงินเข้ม เมื่อนำมาชุบจะต้องอุ่นให้มีอุณหภูมิประมาณ 90°C ใช้เวลาในการชุบประมาณ 10 - 20 นาที ข้อควรระวังน้ำยาที่ใช้ในการชุบควรจะเป็นน้ำยาใหม่ถ้าเก่าอาจจะทำให้ชุบติดได้ไม่ค่อยดีรวมทั้งอาจจะกัดอลูมิเนียมที่ผิวสัมผัสด้วย การควบคุมอุณหภูมิและค่า pH ของน้ำยาลำคัญต่อการชุบมากเพราะจะเป็นตัวที่กำหนดว่าจะชุบได้ดีหรือไม่

ภาคผนวก จ

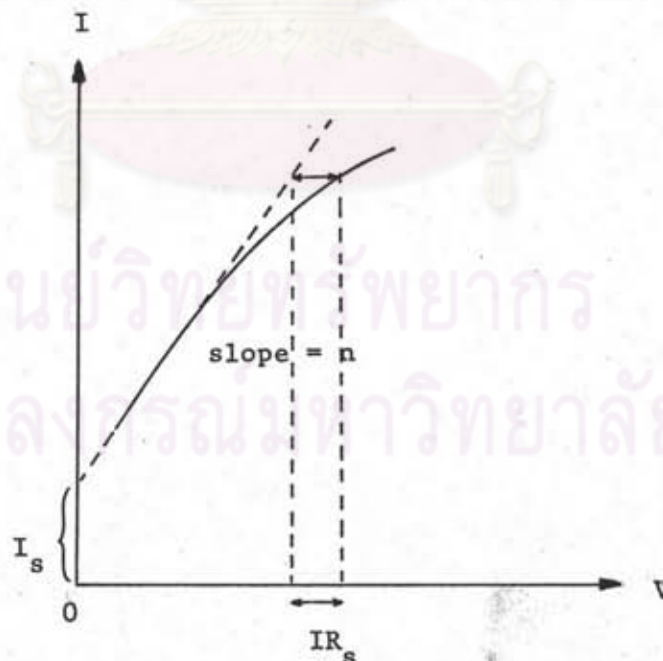
การหาค่าความต้านทานอนุกรม

การหาค่าความต้านทานอนุกรมสามารถหาได้หลายวิธี [46 - 52] เช่น หาจากการวัด Dark Forward bias Characteristic โดยส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าความชันของ $\exp(qV/kT)$ จะเป็นค่าความต้านทานอนุกรม [46] ดังรูปที่ จ.1, หาได้จากวิธีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง [47] หรือใช้วิธีวัดแบบ Dark Forward Bias Characteristic แล้วแทนค่าในสมการ จ.1 [48] เป็นต้น

$$R_s \approx (V' - V_{oc}) / I_{sc} \quad \text{จ.1}$$

โดยที่ V' คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดเมื่อกระแสไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับ I_{sc}

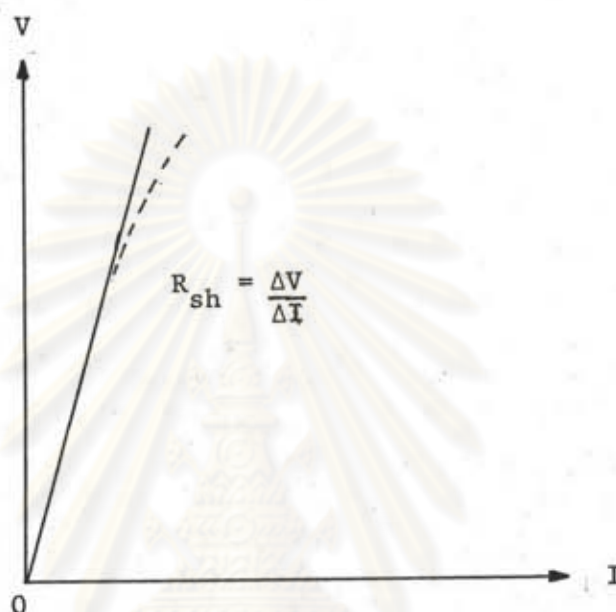
ในการวัดค่าความต้านทานอนุกรมในการทดลองนี้เลือกใช้วิธีแทนค่าในสมการ จ.1 เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายมากไม่สามารถลากเส้นความชันตามวิธีแรกได้



รูปที่ จ.1 การวัดค่าความต้านทานอนุกรมโดยวิธีวัดส่วนเบี่ยงเบนความชัน $\exp(qV/kT)$

การวัดค่าความต้านทานขนาน

การวัดค่าความต้านทานขนานสามารถหาได้จากการลากเส้นตรงสัมผัสกับเส้นกราฟที่ได้จาก Dark Reverse Bias Characteristic ดังแสดงไว้ในรูปที่ จ.2 [53]



รูปที่ จ.2 การวัดค่าความต้านทานขนาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายประคนเดช นิละคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2506 ที่กรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2527 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน ขณะที่ศึกษาอยู่ในระดับบัณฑิตศึกษานี้ ในปี พ.ศ. 2528 ได้มีโอกาสเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบัน ครั้งที่ 8 ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ และในปี พ.ศ. 2529 ได้มีโอกาสเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 9 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และในปีเดียวกันได้ทำงาน Part time กับบริษัท DOS 36 จำกัด ในปี พ.ศ. 2531 เริ่มทำการวิจัยเรื่อง Software ทางอุตสาหกรรมให้กับภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย