

บทที่ 3

กลไกการเคลื่อนที่ของพาหะในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำนั้นถูกกำหนดโดยการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำผ่านผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ จำนวนของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำ อุณหภูมิ และค่าแบริ่งเรียร์ ϕ_b ในกรณีของสารประกอบกึ่งตัวนำของกลุ่ม III-V ภายใต้แรงดันไบอัสตาม (Forward bias) กระแสที่ไหลผ่านผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำถูกกำหนดโดยกลไก Thermionic emission กลไก Field emission และกลไกที่เกิดขึ้นในแบบผสมระหว่างกลไกทั้งสองข้างต้น ซึ่งเรียกว่า Thermionic-field emission ในกลไก Thermionic emission พาหะข้างมากเคลื่อนที่ด้วยพลังงานค้ำยกที่มีค่าสูงกว่า V_{ϕ} (ดูรูปที่ 2.4) จากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ในกลไกของ Field emission พาหะนั้นจะเคลื่อนที่ผ่านแบริ่งเรียร์ โดยไม่มีการเปลี่ยนระดับพลังงานคือพาหะเคลื่อนที่ทะลุแบริ่งเรียร์ไปตามระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ส่วน Thermionic-field emission พาหะจะเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบริ่งเรียร์ในระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี นอกจากกลไกทั้งสามข้างต้นแล้วยังมีกลไกอื่น ๆ ที่นอกเหนือไปจากกลไกข้างต้น ได้แก่ การรวมตัวของพาหะในเขตปลอดพาหะและในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (Bulk) ซึ่งมีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำภายใต้แรงดันไบอัสย้อนเท่านั้น จึงไม่ขอกล่าวในที่นี้

3.1 กลไก Thermionic emission (ลักษณะสมบัติของการเรียงกระแส)⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

กลไก Thermionic emission เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำข้ามแบริ่งเรียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ ซึ่งลักษณะของการเคลื่อนที่เป็นแบบ Diffusion และ Drift โดยความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่านหัวต่อมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ตามสมการที่ (3.1)

$$J = A^* T^2 \text{Exp}(-q\phi_B/kT) (\text{Exp}(qV/kT) - 1) \quad (3.1)$$

โดยค่า A^* สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$A^* = 4\pi q m^* k^2 / h^3 \quad (3.2)$$

ซึ่ง A^* คือ ค่า Richardson's constant

m^* คือ ค่า Effective mass ของพาหะในสารกึ่งตัวนำ

k คือ ค่า Boltzman's constant

h คือ ค่า Plank's constant

จากสมการที่ (3.1) แสดงให้เห็นคุณสมบัติของการเรียงกระแส ซึ่งกลไกนี้เป็นกลไกที่เกิดขึ้นในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ในเงื่อนไขที่สารกึ่งตัวนำมีค่าความเข้มข้นของสิ่งเจือปนต่ำๆ และค่า ϕ_B นั้นเป็นอิสระจากแรงดันไบอัสที่บ่อนแก่วัสดุ แต่ความจริงแล้วค่า ϕ_B นั้นขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ โดยแปรผันโดยตรงแรงดันไบอัสที่บ่อนให้แก่วัสดุ ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ของ ϕ_B และแรงดันไบอัสดังนี้

$$\phi_B = \phi_{B1} + \beta V \quad (3.3)$$

โดย β เป็นค่าคงตัว และ ϕ_{B1} เป็นค่าพลังงานแบร์เรียร์ในเงื่อนไขที่ไม่มีแรงดันไบอัส ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$\phi_{B1} = \phi_B - \alpha E_m (V=0) - \Delta\phi_B (V=0) \quad (3.4)$$

ดังนั้น หากเขียนสมการที่ (3.1) ใหม่จะได้

$$J = A^* T^2 \text{Exp}(-q\phi_{B1}/kT) (\text{Exp}(qV/nkT) - 1) \quad (3.5)$$

$$\text{หากให้ } J_{OT} = A^* T^2 \text{Exp}(-q\phi_{B1}/kT) \quad (3.6)$$

$$\text{และ } n = (1-\beta)^{-1} \quad (3.7)$$

โดย n คือค่า Ideality Factor ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นในอุดมคติของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) เราจะได้

$$J = J_{OT} \text{Exp}(qV/nkT) \quad (3.8)$$

3.2 กลไก Field emission และ Thermionic-field emission (ลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสไอทรมมิก) (3) (4) (5)

ในกรณีผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่มีสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นของพาหะสูง โอกาสที่พาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำจะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์เข้าไปในโลหะนั้นมีมากขึ้น เนื่องจากความกว้างของเขตปลอดพาหะที่เป็นแบร์เรียร์นั้นลดลง อันเป็นผลมาจากจำนวนพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้พาหะในสารกึ่งตัวนำมีพลังงานสูงขึ้นเพียงพอ จำนวนของพาหะที่สามารถผ่านทะลุแบร์เรียร์จะมีจำนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่ที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์ของพาหะที่ถูกกระตุ้นจากผลของอุณหภูมินั้นจะเกิดในบริเวณใกล้เคียงกับยอดของแบร์เรียร์ ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่แบบนี้มีลักษณะคล้ายกับ Thermionic emission กลไกการเคลื่อนที่ของพาหะในลักษณะนี้เราเรียกว่า Thermionic-field emission ต่างกันแต่เพียงลักษณะการเคลื่อนที่เท่านั้นคือกลไก Thermionic emission การเคลื่อนที่นั้นเป็นการเคลื่อนที่ข้ามยอดของแบร์เรียร์ ส่วนกลไก Thermionic-field emission การเคลื่อนที่นั้นเป็นการเคลื่อนที่ทะลุผ่านส่วนยอดของแบร์เรียร์ โดยกลไกทั้งสองนั้นอาศัยพลังงานกระตุ้นจากความร้อนของอุณหภูมิที่มีค่าสูง ถ้าหากการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์ โดยการเคลื่อนที่นั้นเป็นอิสระจากอุณหภูมิ เนื่องจากพาหะเหล่านั้นมีพลังงานสูงเพียงพอ ซึ่งโอกาสที่พาหะเหล่านั้นมีพลังงานมากเพียงพอ

ที่จะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์ที่มี Diffusion potential (V_d) คือ Transmission Probability (P) โดยมีค่าตามสมการที่ (3.9)

$$P = \exp \left[\frac{-2(qV_d - E)^{3/2}}{3E_{00}(qV_d)^{1/2}} \right] \quad (3.9)$$

ซึ่ง

$$E_{00} = \frac{hq}{4\pi} \sqrt{\frac{N_d}{m^*e_s}} \quad (3.10)$$

ตัวแปร E_{00} มีหน่วยเป็นปริมาณพลังงาน ซึ่งบ่งบอกความสามารถของพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำในการเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์

3.3 อิทธิพลของกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะในผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของผิวสัมผัส⁽⁵⁾

3.3.1 กลไก Field emission เกิดในเงื่อนไขที่สารกึ่งตัวนำมีค่าความเข้มข้นของพาหะสูงมากหรืออุณหภูมิมีค่าต่ำ ซึ่งมีความหมายว่า $E_{00} \gg kT$ พาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำจาก State ที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิ E_{F_s} ไปสู่ State ที่ว่างในโลหะ โดยความหนาแน่นของกระแสในเงื่อนไขมีค่าตามสมการที่ (3.11)

$$J = J_{OF} \exp(qv/E_{00}) \quad (3.11)$$

ซึ่ง

$$J_{OF} = \frac{\pi A^* T}{kC_1 \sin(\pi kTC_1)} \exp(-q\phi_B/E_{00}) \quad (3.12)$$

$$C_1 = (2E_{00})^{-1} \ln[-4(\phi_B - V)/\xi] \quad (3.13)$$

โดยในเงื่อนไข $\xi = E_c - E_{F_s}$ นั้นมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เมื่อสารกึ่งตัวนำมีค่าความเข้มข้นพาหะสูงจนเรียกว่า Degenerate จากสมการที่ (3.11) จะเห็นว่าลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันนั้นขึ้นกับอุณหภูมิน้อยมาก แต่ขึ้นกับ E_{00} ซึ่งมีผลต่อการนำไฟฟ้าในกลไกนี้ อย่างเด่นชัด

3.3.2 กลไก Thermionic-field emission เกิดในเงื่อนไขที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของพาหะที่ทำให้ $E_{oo} \approx kT$ พาหะที่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์ที่ระดับพลังงาน E_m ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขอบของ Conduction Band ในสารกึ่งตัวนำ⁽⁶⁾ และความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติของความหนาแน่นกระแสและแรงดันตามสมการที่ (3.14)

$$J = J_{OTF} \text{Exp}(qV/E_o) \quad (3.14)$$

$$J_{OTF} = \frac{A^* T \sqrt{[\pi(E_{oo} q(\phi_b - V - \xi))] \exp[-(q\xi/kT) - q(\phi_b - \xi)/E_o]}}{k \cosh(E_{oo}/kT)} \quad (3.15)$$

$$E_o = E_{oo} \text{Coth}(E_{oo}/kT) \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.14) อันเป็นกลไกของ thermionic-field emission โดยระดับ E_m นั้นเป็นระดับพลังงานที่พาหะเคลื่อนที่ทะลุผ่านแบร์เรียร์⁽⁷⁾ ตามสมการที่ (3.17)

$$E_m = q(\phi_b - V - \xi) \text{Cosh}^{-2}(E_{oo}/kT) \quad (3.17)$$

3.3.3 กลไก Thermionic emission เกิดในเงื่อนไขอุณหภูมิสูงหรือสารกึ่งตัวนำมีความเข้มข้นของพาหะมีค่าต่ำ ซึ่งมีความหมายว่า $E_{oo} \ll kT$ พาหะที่เคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะนั้นเคลื่อนที่ข้ามแบร์เรียร์ โดยความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติของความหนาแน่นกระแสและแรงดันตามสมการที่ (3.8)

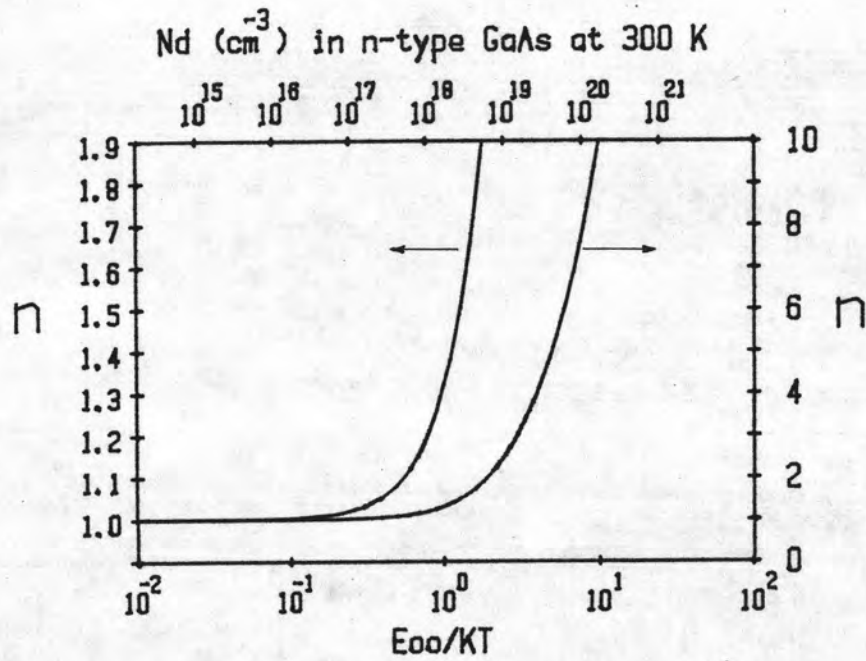
$$J = J_{OT} \text{Exp}(qV/nKT) \quad (3.8)$$

จากกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะข้างต้น เราสามารถใช้สมการที่ (3.8) ในการตรวจสอบลักษณะสมบัติของความหนาแน่นกระแสและแรงดันจากสมการที่ (3.8) และ (3.16) เราจะได้ค่า Ideality Factor จากสมการที่ (3.18)

$$n = E_o/KT = \frac{E_{oo}}{kT} \text{Coth}(E_{oo}/kT) \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) ค่า n หรือ Ideality Factor นั้นแปรผันโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ (N_u, N_d) จากรูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.18) ประกอบด้วยค่า n ในย่าน Thermionic emission Thermionic-field emission และ Field emission และจุดเปลี่ยนกลไก ในกรณีของแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็นนั้นจุดเปลี่ยนกลไกจาก Thermionic emission ไปสู่ Thermionic-field emission อยู่ในช่วงความเข้มข้นของพาหะประมาณ $10^{17}-10^{18}$ ซม.⁻³ เนื่องจากค่า Electron effective mass ของแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นมีค่าต่ำ

การเคลื่อนที่ของพาหะทะลุผ่านแบร์เรียร์ที่ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำเป็นลักษณะสมบัติที่ต้องการนั้นเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิก โดยมีลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันที่เป็นเชิงเส้น ในย่านแรงดัน V อันเป็นแรงดันตกคร่อมผิวสัมผัสโดยไม่มีการเรียงกระแส และแรงดันที่ตกคร่อมในผิวสัมผัสนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างหลักของสิ่งประดิษฐ์ แต่อย่างไรก็ดีผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีลักษณะสมบัติของความหนาแน่นกระแสและแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการที่ (3.19)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของค่า Ideality factor n ของข้อต่อกึ่งไดโอด และค่า E_{00} ตามสมการที่ (3.18)

$$J = J_0 [\text{Exp}(V/V_0) - 1] \quad (3.19)$$

ซึ่ง V_0 และ J_0 เป็นค่าแรงดันที่ไบอัสและค่าความหนาแน่นกระแส โดยปกติแล้ว ตัวแปรทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันที่ขึ้นกับกลไกการเคลื่อนที่ของพาหะ หาก $V \ll V_0$ เราจะได้สมการที่ (3.19) ใหม่เป็นสมการที่ (3.20)

$$J = J_0 (V/V_0) \quad (3.20)$$

ดังนั้นลักษณะสมบัติของความหนาแน่นกระแสและแรงดันจึงเป็นเชิงเส้น ซึ่งเราสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.20) โดยไม่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของ J_0 และ V ผิวสัมผัสโอห์มมิกนั้น J_0 จะต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ความต้านทานผิวสัมผัสมีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดเงื่อนไข $V \ll V_0$ ขณะที่ถูกไบอัส จากสมการที่ (3.8) (3.11) และ (3.14) ค่า J_0 ในสมการที่ (3.20) จะต้องมีค่าที่สุดในกรณีที่เกิดกลไกการเคลื่อนที่นั้นเป็นแบบ Field emission เมื่อสารกึ่งตัวนำมีความเข้มข้นของพาหะสูง เพราะฉะนั้นผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่ต้องการค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสที่มีค่าต่ำนั้นต้องการเงื่อนไขที่ว่าสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นของพาหะสูง

3.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ^{(3) (4) (5)}

ค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัส r_c สามารถหาได้จากสมการที่ (3.21)

$$r_c = (\partial V / \partial J)_{V=0} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ (3.21) เราจะได้ค่าความต้านทานผิวสัมผัสจำเพาะ r_c ดังนี้คือ

3.4.1 สำหรับกลไก Field emission ในเงื่อนไข $E_{00} \gg kT$

$$r_c = \left[\frac{A^* T \pi q}{k \sin(\pi C_1 k T)} \exp(-\phi_b / E_{00}) - \frac{A^* q}{C_1 k^2} \exp(-(\phi_b / E_{00}) + C_1 q \xi) \right]^{-1} \quad (3.22)$$

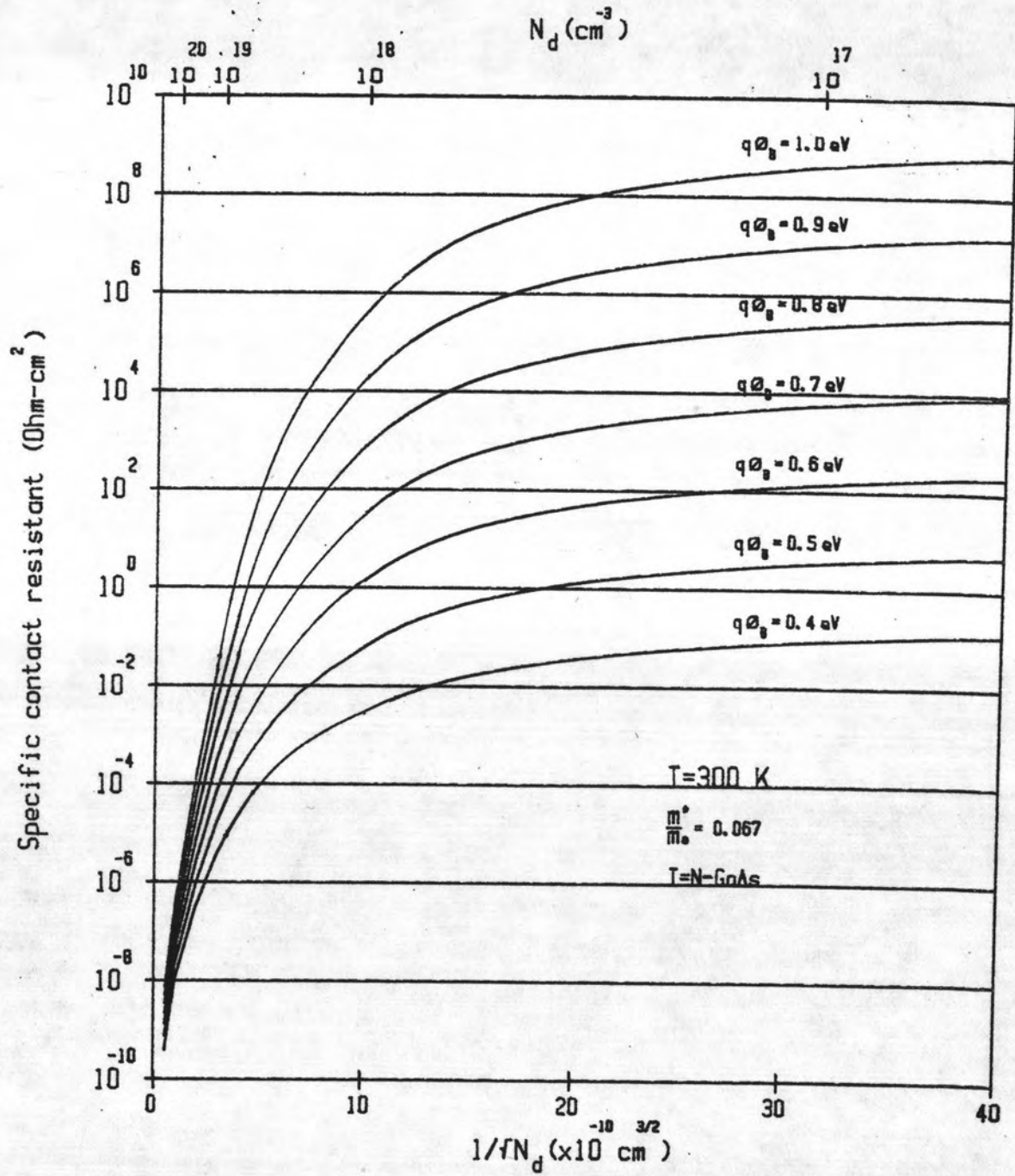
3.4.2 สำหรับกลไก Thermionic-field emission ในเงื่อนไข $E_{00} \approx kT$

$$r_c = \frac{k^2 \cosh(E_{00}/kT)}{qA^* [\pi q (\phi_{\square} + \xi) E_0]^{1/2}} \coth[E_{00}/kT]^{1/2} \exp[q(\phi_{\square} - \xi)/E_0 + q\xi/kT] \quad (3.23)$$

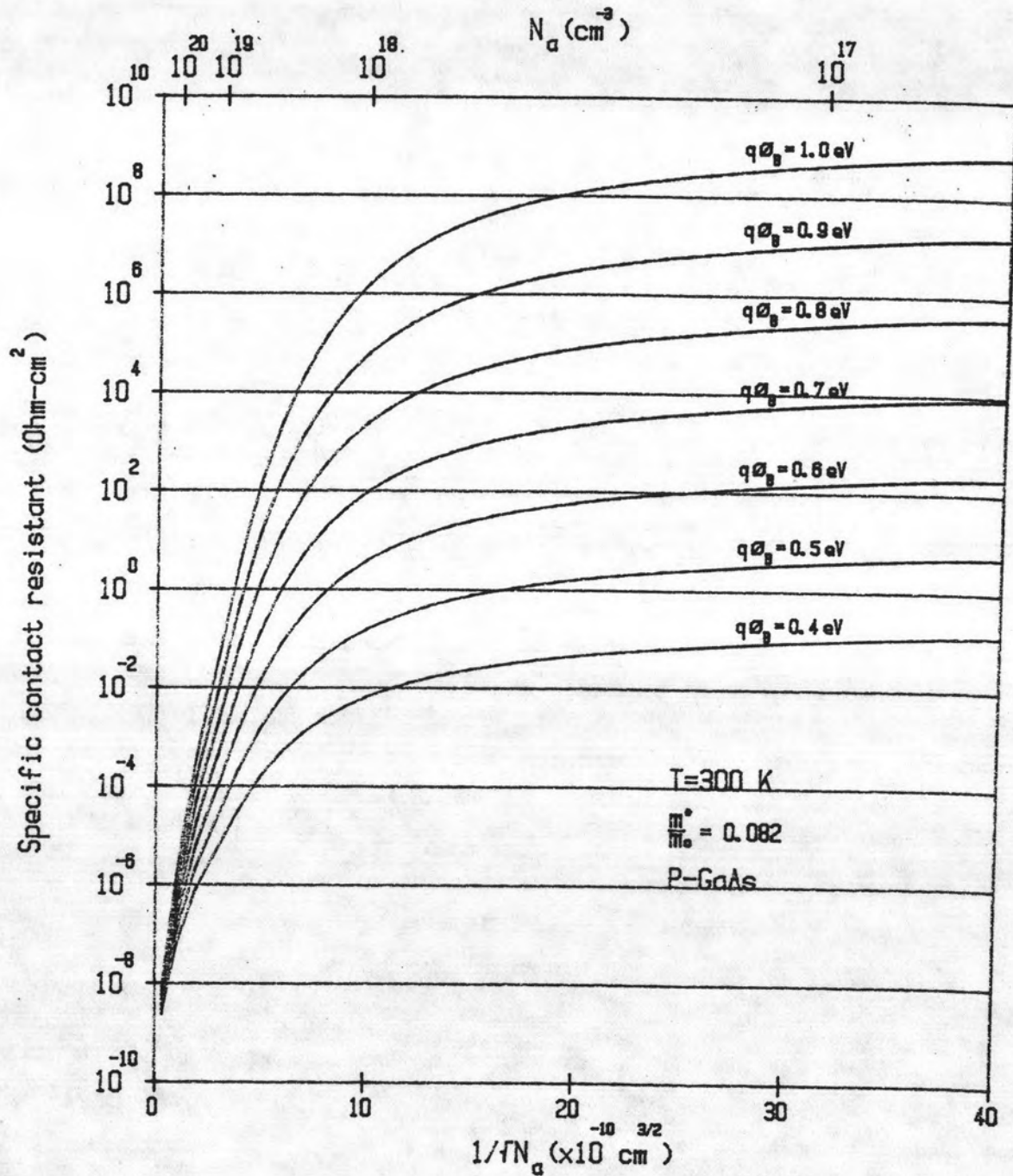
3.4.3 สำหรับกลไก Thermionic emission ในเงื่อนไข $E_{00} \ll kT$

$$r_c = \frac{k}{qA^* T} \exp(q\phi_{\square}/kT) \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.22) (3.23) และ (3.24) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานจำเพาะและความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 อันเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ ชนิดเอ็นและชนิดพี ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจำเพาะผิวสัมผัสของ
 แกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิด n และค่าความเข้มข้นของพาหะ (N_d)
 โดยมีเงื่อนไขของค่าแบร์เรียร์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 K



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานผิวสัมผัสจำเพาะของ
 แกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพีและค่าความเข้มข้นของพาหะ (N_d)
 โดยมีเงื่อนไขของค่าแบริเออร์เรียร์ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 K