



UDK: 621.315.592

Muniraxon O'KTAMOVA,
O'zMU huzuridagi YaFMITI, k.i.x., PhD
E-mail:umk9391@gmail.com

NamDU professori, f-m.f.d B.Abdulazizov taqrizi asosida

SIMULATION OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF A TUNNEL DIODE UNDER THE INFLUENCE OF PHOTOCURRENT AND PHONONS

Annotation

In this study, a comprehensive current model for tunnel diodes has been developed. The model includes not only tunneling, diffusion, and excess currents, but also the photocurrent generated under illumination. Additionally, phonon-assisted tunneling processes - namely phonon absorption and phonon emission - resulting from electron-phonon interactions have been taken into account. The calculated current-voltage ($I-V$) characteristics under illuminated conditions demonstrate a decrease in the total current. Furthermore, it is shown that the value of the photocurrent increases proportionally with optical intensity and wavelength. In the case of phonon absorption, electrons gain additional energy, the tunneling window expands, and the peak current increases by approximately 15–20%. Conversely, during phonon emission, part of the electron energy is lost, the tunneling probability decreases, and the maximum current drops by about 10–12%. The obtained results indicate that considering both phonon and photon processes significantly enhances the potential application of tunnel diodes in optoelectronic and photodetector devices. The proposed model provides a theoretical foundation for the development of tunnel diodes as high-frequency, light-sensitive, and energy-efficient devices.

Key words: tunnel diode, photocurrent, diffusion current, excess current, semiconductor modeling, phonon-assisted tunneling process, optoelectronic devices

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФОТОТОКА И ФОНОНОВ

Аннотация

В данной статье разработана единая модель тока для туннельных диодов. В состав модели включены не только туннельный, диффузионный и избыточный токи, но и фототок, возникающий под воздействием освещения. Кроме того, учтены туннельные процессы с участием фононов — поглощение и испускание фононов, возникающие в результате взаимодействия между электронами и фононами. Расчётные вольт-амперные характеристики (ВАХ) при освещении показали уменьшение общего тока. Также продемонстрировано, что величина фототока увеличивается пропорционально оптической интенсивности и длине волны. В случае поглощения фононов электроны получают дополнительную энергию, туннельный канал расширяется, и пиковый ток увеличивается примерно на 15–20%. Напротив, при испускании фононов часть энергии электронов теряется, вероятность туннелирования снижается, и максимальный ток уменьшается примерно на 10–12%. Полученные результаты показывают, что учет фотонных и фононных процессов значительно расширяет возможности применения туннельных диодов в оптоэлектронике и фотодетекторных устройствах. Предложенная модель создаёт теоретическую основу для разработки туннельных диодов как высокочастотных, чувствительных к свету и энергоэффективных приборов.

Ключевые слова: туннельный диод, фототок, диффузионный ток, избыточный ток, моделирование полупроводников, туннельный процесс с участием фононов, оптоэлектронные устройства

FOTOTOK VA FONON TA'SIRIDA TUNNEL DIODINING VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASINI SIMULYATSIYA QILISH

Annotatsiya

Ushbu maqolada tunnel diodlar uchun yagona tok modeli ishlab chiqildi. Model tarkibiga nafaqat tunnel, diffuziya va ortiqcha toklar, balki yoritilish ta'sirida hosil bo'ladigan fototok ham kiritilgan. Bundan tashqari, elektron-fonon o'zaro ta'siri natijasida yuzaga keladigan fonon yordamida tunnel jarayonlari – ya'ni fonon yutilishi va fonon nurlanishi – ham hisobga olingan. Hisoblangan tok-kuchlanish ($I-V$) xarakteristikalari yoritilgan holatda umumiy tokning pasayishini ko'rsatdi. Shuningdek, fototokning qiymati optik intensivlik va to'lqin uzunligiga mutanosib ravishda ortishi namoyish etildi. Fonon yutilishi holatida elektronlar qo'shimcha energiya oladi, tunnel kanali kengayadi va cho'qqi toki taxminan 15–20% ga oshadi. Aksincha, fonon nurlanishi jarayonida elektron energiyasining bir qismi yo'qoladi, tunnel ehtimoli kamayadi va maksimal tok taxminan 10–12% ga kamayadi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, fonon va foton jarayonlarini hisobga olish tunnel diodlarning optoelektronika va fotodetektor qurilmalaridagi qo'llanish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi. Taklif etilgan model tunnel diodlarini yuqori chastotali, yorug'likka sezgir va energiya tejamkor qurilmalar sifatida ishlab chiqish uchun nazariy asos yaratadi.

Kalit so'zlari: tunnel diod, fototok, diffuziya toki, ortiqcha tok, yarimo'tkazgich modellashtirish, fonon yordamida tunnel jarayoni, optoelektron qurilmalar.

Kirish. So'nggi yillarda tunnel diodlarning optoelektron xossalarini o'rganishga qiziqish sezilarli darajada oshdi. Yoritish ta'sirida qo'shimcha fototok hosil bo'lib, u diodning umumiy I-V xarakteristikasini o'zgartiradi. Bilvosita tarmoqli o'tishga ega yarimo'tkazgichlarda, masalan, kremniy (Si) da foton yutilishi fononlar yordamida amalga oshadi [1], bu esa fototokning spektral taqsimotiga kuchli ta'sir ko'rsatadi.

Shunday qilib, tunnel dioddagi umumiy tok bir nechta komponentlardan iborat:

1. to'g'ridan-to'g'ri tunnellanish toki;
2. fonon ishtirokidagi tunnellanish toki (PAT);
3. diffuziya va ortiqcha tok komponentlari;
4. yoritish ta'sirida hosil bo'ladigan fototok.

Ammo hozirgacha bu jarayonlarning barchasini yagona modelda birlashtirish bo'yicha yetarli ishlar qilinmagan. Shu sababli, ushbu ishda biz tunnel diodlar uchun fototok va fonon ishtirokini aniq hisobga oluvchi kompleks tok modelini taklif qilamiz. Tunnel diodlarda hosil bo'ladigan tokni hisoblash uchun tadqiqotchilar tomonidan turli xil modellarning keng doirasi taklif qilingan. Qanchalik ko'p model mavjud bo'lmasin, ishonchli tunnel tok modeli diodlarga xos uchta asosiy xususiyatni qayta tiklashi lozim. Tsu-Esaki modelida ushbu xususiyatlarning ayrimlari aks etgan bo'lsa-da, modelda dioddagi ortiqcha va diffuziya toklari butunlay hisobga olinmagan.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. O.Kan tomonidan taklif etilgan modelda esa tunnellanish tokining o'zgarishi holatlar zichligiga, ya'ni paraboloid va no-paraboloid fonon ishtirokidagi o'tishlarga qo'llanilgan Wenzel-Kramers-Brillouin (WKB) yaqinlashuvlariga bog'liqligi ko'rsatilgan [2]. Franz-Keldysh effekti asosida Karlovsky tunnel diodlardagi tokni hisoblash uchun ancha soddaroq modelni taklif qilgan [3]. Biroq Karlovsky modelida faqat yarimo'tkazgichning n-sohasidagi energiya zonalarning egilishi hisobga olingan [4]. Yajima va Esaki ortiqcha tok tushunchasini muhokama qilgan bo'lsalar-da, tunnel diodlarda ortiqcha tokni hisoblashning to'liq modeli asosan Chaynovez tomonidan taklif qilingan [5]. Biroq vaqt o'tishi bilan yangi savollar paydo bo'ldi. Tunnel dioddagi umumiy tok faqat tunnellanish, ortiqcha va diffuziya toklarining yig'indisi bilan chegaralanmaydi. Unga qo'shimcha ravishda yoritish ta'sirida hosil bo'ladigan fototok va generatsiya-rekombinatsiya jarayonlaridan kelib chiqadigan tok ham hisobga olinishi kerak. Tunnel diodlarda tokining asosiy manbai - bu valentlik zonasidagi to'lgan holatlardan o'tkazuvchanlik zonasidagi bo'sh holatlarga elektronlarning kvant tunnellanishidir.

Klassik tunnellanish sharoitida elektron energiyalari aynan mos kelishi kerak. Ammo Tien va Gordon haqiqiy sharoitlarda fononlarning tunnel diodlarda muhim rol o'ynashini ko'rsatganlar. Tashqi elektromagnit maydon mavjud bo'lganda, tunnellanish jarayoniga fonon ishtirokidagi tunnellanish (PAT) ham qo'shiladi. Ushbu mexanizm asosiy tunnellanish yo'lidan tarmoqlanadigan qo'shimcha sun'iy toklarni keltirib chiqaradi [6].

Natijada PAT tunnel diodning tok-kuchlanish (I-V) xarakteristikalarini boyitadi, bu ta'sir esa ayniqsa yoritish ostida yanada kuchayadi, chunki fotonlar va fononlar birgalikda qo'shimcha o'tish kanallarini hosil qiladi.

Tunnel diodlar (Esaki diodlari) yarimo'tkazgich qurilmalari orasida eng muhim nolinear elementlardan biridir. Ularning o'ziga xos xususiyati - manfiy differensial qarshilik (NDR) bo'lib, u kvant tunnellanish natijasida vujudga keladi. Shu sababli tunnel diodlar yuqori chastotali elektronika, generatorlar va aralastirgichlarda keng qo'llaniladi [7].

Tadqiqot metodologiyasi

p va n-o'tishni tunnel diodlarda kovak va elektronlar energiyasi, $f_1(E_1)$ va $f_2(E_2)$ lar yarimo'tkazgichning p va n-sohalardagi kovak va elektronlar uchun Fermi-Dirak taqsimot funksiyalari bo'lib, ularning farqi: $f_1(E_1) - f_2(E_2) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} -$

$\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1}$ ko'rinishga ega. Shaffoflik koeffitsiyenti uchun quyidagi [9]:

$$P = \exp\left(-\frac{\alpha E_t^2}{F}\right) \quad (1)$$

formuladan foydalanamiz, bu yerda F-maydon kuchlanganligi, $E_t = E_g - qV + \mu_n + \mu_p$; $\alpha = \theta \frac{4\sqrt{2m_e}}{3qh}$; $\theta \approx 1$ (θ -Chaynovez modelining o'zgarish parametri) tengliklardan foydalanib quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$I_T = APT \int_0^{\mu_n + \mu_p - qV} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} \right) \sqrt{\varepsilon(qV_k - E_g - qV - \varepsilon)} d\varepsilon \quad (2)$$

Endi ushbu ifodadan foydalanib diffuzion tokni hisobga olgan holdagi tunnel diodi VAX si uchun quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$I = APT \int_0^{\mu_n + \mu_p - qV} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} \right) \sqrt{\varepsilon(qV_k - E_g - qV - \varepsilon)} d\varepsilon + I_0 \left(\exp\left(\frac{-qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

Chaynovez taqdim etgan modeli bo'yicha tunnel diodidagi ortiqcha tok uchun olingan quyidagi:

$$I_{CH} = D * P = \int \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)\right) d\varepsilon * \exp\left(-\frac{\theta \sqrt{2m_e} (E_g - qV + \mu_n + \mu_p)^{\frac{3}{2}}}{3qhF}\right) \quad (4)$$

bu yerda D holatlar zichligi uchun Kan taqdim etgan modeldan foydalandik. Tunnel diodlar katta tokka va ayrim hollarda yuqori haroratlarga bardoshli bo'lishi talab etiladi. Buni ta'minlash uchun yarimo'tkazgich materialini kuchli legirlash yoki geterootishlardan foydalanish maqsadga muvofiqdir. Bu usullar natijasida taqiqlangan zonada ko'plab diskret energetik sathlar hosil bo'ladi. Hisoblashlarni soddalashtirish uchun biz holatlar zichligi qiymatini birga teng deb qabul qildik.

n-yarimo'tkazgichning o'tkazuvchanlik zonasidagi elektronlar p-yarimo'tkazgichning man qilingan zonasidagi elektronlar, p-yarimo'tkazgichning man qilingan zonasidagi aralashmalarining energetik sathiga o'tib, so'ngra o'zidan fonon chiqarib aralashmalarining energetik sathiga o'tib, so'ngra o'zidan fonon chiqarib, valentlik zonasiga tushishi mumkin. Yoki elektronlar oldin fonon chiqarib aralashmalarining energetik sathiga tushib, so'ngra p-yarimo'tkazgichning valentlik zonasiga o'tishi mumkin. Bu hodisa tunnel diodlarining volt-ampere harakteristikasidagi minimum tokning, ya'ni ortiqcha tokning miqdorini oshirishga olib keladi. Yarimo'tkazgich diodda yorug'lik yutilganda elektron-kovak juftlari hosil bo'ladi. Ularning oqimi tashqi konturga chiqib fototok $-(I_{ph})$ hosil qiladi.

Yorug'lik diodga tushganda, har bir yutilgan foton bir elektron-kovak juftligi (EHP) hosil qiladi. Agar bu tashuvchilar rekombinatsiyaga ulgurmay kontaktlarga yetib borsa, ular tok beradi.

Optik kuch (quvvat) P_{opt} -diodga tushmoqda. Har bir foton energiyasi:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

Photocurrent in a tunnel diode arises due to photon absorption, and is proportional to the incident optical power. By relating the photon flux to the optical power and introducing the external quantum efficiency η , the photocurrent expression is derived as [10-11]:

$$I_{ph} = q\eta \frac{P_{opt}\lambda}{hc} \quad (6)$$

η - tashqi kvant samaradorligi ($0 \leq \eta \leq 1$), ya'ni nechta foton tashuvchiga aylanadi.

h -Plank doimiysi, c -yorug'lik tezligi, fonon yutulishi ($E_g - \hbar\omega$):

Elektron fonon energiyasini yutib, qo'shimcha energiya orttiradi. Shu sababli, odatda bayer orqali o'ta olmaydigan elektron ham tunnellanish jarayonida ishtirok etishi mumkin bo'ladi. Bu yangi tunnellanish kanalini ochadi va umumiy tok ortishiga olib keladi. Zona diagrammada esa elektron pastroq energetik darajadan chiqib, fonon yordami bilan yuqoriga ko'tarilib, tunnelingdan o'tadi.

Tunnel diodi uchun umumiy tok ifodasi fototokni hisobga olsak quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$I = I_T + I_X + I_{dif} + I_{ph} \quad (7)$$

Fonon chiqarilishi ($E_g + \hbar\omega$)-elektron tunneling vaqtida fonon chiqarib, o'z energiyasining bir qismini yo'qotadi. Natijada tunneling uchun talab qilinadigan boshlang'ich energiya yuqoriroq bo'ladi. Bu holatda tunnelingga qodir elektronlar soni kamayadi va umumiy tok pasayadi. Zona diagrammada elektron yuqori energetik holatdan kelib, tunneling jarayonida fonon chiqarib, pastroq darajaga tushadi.

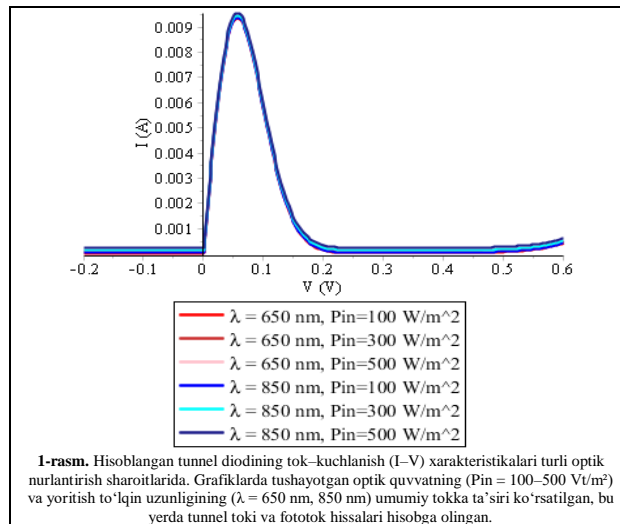
Yuqorida keltirilgan (7) ifodaga xadmi-had ifodalarni to'ldiradigan bo'lsak,

$$I = APT \left(\int_0^{\mu_n + \mu_p - qV} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} \right) \sqrt{\varepsilon(qV - E_g - qV - \varepsilon)} \right) d\varepsilon + I_o \left(\exp\left(\frac{-qV}{kT}\right) - 1 \right) \int \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n}{kT}\right) + 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu_n + qV}{kT}\right) + 1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{E_2}{E_g - qV + \mu_n + \mu_p}\right)\right) d\varepsilon * \exp\left(-\frac{\theta \sqrt{2m_e} (E_g - qV + \mu_n + \mu_p)^{\frac{3}{2}}}{3qhF}\right) + q\eta \frac{P_{opt}\lambda}{hc} \quad (8)$$

Tunnel diodning o'tish ko'effitsiyentini fonon yutilganda quyidagi shakldan $P = \exp\left(-\frac{\alpha(E_t + \hbar\omega)^{\frac{3}{2}}}{F}\right)$; fonon chiqarganda, $P = \exp\left(-\frac{\alpha(E_t - \hbar\omega)^{\frac{3}{2}}}{F}\right)$ shaklga o'tadi.

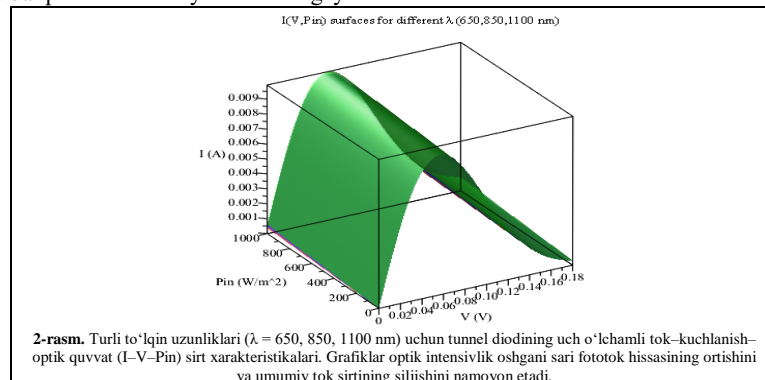
Tahlil va natijalar

Yuqorida keltirilgan (8) ifoda tunnel diodning umumiy tok modelini ifodalaydi, bunda fototokning hissasi ham inobatga olingan. Tunnel diodning umumiy toki yorug'lik oqimi va to'lqin uzunligiga sezgir bo'lib, fototokning ta'siri natijasida volt-ampere xarakteristikalarda sezilarli siljish kuzatiladi. Fototok yorug'lik quvvatiga (P_{in}) mutanosib ravishda ortadi va diodning tok-kuchlanish egri chizig'ini bevosita shakllantiradi. Quyidagi 1-rasmda turli yorug'lik intensivliklari (P_{in}) va to'lqin uzunliklari (λ) uchun hisoblangan I-V xarakteristikalar keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, yorug'lik oqimining ortishi bilan umumiy tokning qiymati oshadi. Shu bilan birga, qisqaroq to'lqin uzunliklari (ya'ni, yuqori energiyali fotonlar) tunnellanish jarayonining samaradorligini oshiradi. Olingan natijalar tunnel diodlarning optik maydonga yuqori sezgirlikni tasdiqlaydi hamda ularni fotodetektor va turli optoelektron qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini kengaytiradi.



Tunnel diodning hisoblangan uch o'lchovli I–V–Pin xarakteristikasi esa 2-rasmda keltirilgan. Grafik turli to'liq uzunliklari uchun tunnel, diffuziya va fototoklarning yig'indisini ko'rsatadi. Yorug'lik intensivligi oshganda fototok ortib, umumiy xarakteristika vertikal yo'nalishda siljigan.

Olingan natijalar tunnel diodlarning optik maydonga yuqori sezgirligini tasdiqlaydi hamda ularni fotodetektor va turli optoelektron qurilmalarda qo'llash imkoniyatlarini kengaytiradi.



Xulosa va takliflar. Ushbu ishda tunnel diodning umumiy tokini ifodalovchi yagona model ishlab chiqildi, unda tunnellar tok, diffuziya toki, fototok va fonon o'zaro ta'siri orqali hosil bo'lgan qo'shimcha tashuvchi hissalari hisobga olindi. Taklif etilgan model yordamida yorug'lik oqimi (fototok) va fononlarning elektron tunnellar jarayoniga ta'sirining sifat va miqdor jihatidan ko'rsatildi. Sonli hisob-kitoblar va grafik tahlillar yorug'lik intensivligi va fonon energiyasi ta'sirida tunnel diodlarning tok–kuchlanish xarakteristikasida sezilarli o'zgarishlar yuz berishini namoyish etdi. Olingan natijalar tunnel diodlarning yorug'likka sezgir qurilmalar va yuqori tezlikli optoelektronika sohasida qo'llanilishi uchun nazariy asos yaratadi. Kelajakda ushbu modelni Tien–Gordon modeli va yuqori chastotali elektromagnit maydonlarning ta'sirini ham qo'shib yanada kengaytirish mumkin.

ADABIYOTLAR

1. S.M. Sze, and K.K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2007). 3, 418 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470068328.fmatter>
2. E.O. Kane, Journal of Applied Physics, 32, 83 (1961). <https://doi.org/10.1063/1.1735965>
3. I.Shalish, Journal of applied physics, 124, 075102 (2018). <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5038800>
4. J.S.Karlovsky, Phys. Rev. 127, 419 (1962). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.127.419>
5. A.G. Chynoweth, W.L. Feldman, and R.A. Logan, Phys. Rev. 121, 684 (1961). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.121.684>
6. Tien, P. K., & Gordon, J. P. (1963). *Physical Review*, 129(2), 647–651. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.129.647>
7. Esaki, L. (1958). *Physical Review*, 109(2), 603–604. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.603>
8. M.Lotfi, D.Zohir. International Journal of Control and Automation Vol.9, No. 4 (2016), pp. 39-50. <http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2016.9.4.05>
9. Y. Yan, Silicon-based tunnel diode technology, Dissertation, 22–23 (2008).
10. N. Moulin, A. Mohamed, F. Mandorlo, and M. Lemiti, Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, 126(3), 033105 (2019). <http://dx.doi.org/10.1063/1.5104314>
11. P.R. Berger, Comprehensive Semiconductor Science and Technology, 176 (2011).