

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА КРАЮ ПОЛОС СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Н. И. Стаськов¹, А. Н. Петлицкий², А. А. Сергейчик²,
Л. И. Сотская³, Е. А. Чудаков¹, А. К. Лаврентьев⁴

¹⁾ Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова,
ул. Космонавтов, 1, 212022 Могилев, Беларусь,
e-mail: ni_staskov@mail.ru, kenni_mark@bk.ru

²⁾ ГЦ «Белмикроанализ» научно-технического центра ОАО «Интеграл» – управляющая
компания холдинга «Интеграл», ул. Корженевского, 12, 220108 Минск, Беларусь,
e-mail: petlitsky@integral.by

³⁾ Белорусско-Российский университет, пр. Мира, 43, 212000 Могилев, Беларусь,
e-mail: li_sotskaya@tut.by

⁴⁾ ОАО «Рогачевский завод «Диaproектор», ул. Ленина, 42, 247645 Рогачев, Беларусь,
e-mail: anton_lavren@mail.ru

Аналитически рассчитаны спектры показателей преломления и поглощения в области края полос собственного поглощения и двумя независимыми методами оценена ширина запрещенной зоны плоскопараллельной пластины КДБ-12 с ультратонкими поверхностными слоями. В этой спектральной области наблюдается отличие показателей преломления чистого кремния и кремния, легированного бором. Уменьшение величины запрещенной зоны кремния при легировании бором обусловлено расположением акцепторных уровней примеси в запрещенной зоне кремния около потолка валентной зоны. Уменьшение энергии Урбаха при легировании кремния бором может быть вызвано дефектами кристаллической решетки кремния при внедрении бора.

Ключевые слова: спектры показателей преломления и поглощения; ширина запрещенной зоны; энергия Урбаха; легированный бором кремний.

OPTICAL CHARACTERISTICS OF BORON-DOPED SILICON WAFERS AT THE EDGE OF INNER ABSORPTION BANDS

М. И. Staskov¹, А. N. Petlitsky², А. А. Sergeychik², L. I. Sotskaya³,
Е. А. Chudakov¹, А. K. Lavrentyev⁴

¹⁾ Mogilev State A. Kuleshov University, st. Kosmonavtov, 1, 212022 Mogilev, Belarus

²⁾ State Center «Belmicroanalysis» Scientific and Technical Center JSC «INTEGRAL» – Manager
Holding Company «INTEGRAL», st. Korzhenevsky, 12, 220108 Minsk, Belarus

³⁾ Belarusian-Russian University, Mira Ave, 43, 212000 Mogilev, Belarus

⁴⁾ Rogachev plant «Diaproektor», st. Lenina, 142, 247675 Gomel region, Rogachev, Belarus
Corresponding author: A. N. Petlitsky (petlitsky@integral.by)

The spectra of refractive indices and absorption in the region of the edge of the intrinsic absorption bands were calculated analytically and the width of the forbidden zone of a plane-parallel plate KDB-12 with ultrathin surface layers was estimated by two independ-

ent methods. In this spectral region, a difference in the refractive indices of pure silicon and silicon doped with boron is observed. The decrease in the value of the forbidden zone of silicon when doped with boron is due to the location of the acceptor levels of the impurity in the forbidden zone of silicon near the top of the valence zone. The decrease in the Urbach energy when doping silicon with boron can be caused by defects in the crystal lattice of silicon when introducing boron.

Key words: refractive index and absorption spectral; band gap; Urbach energy; boron-doped silicon.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые пластины, легированные бором, используются в качестве подложек для нанесения планарных структур при создании элементов современной электроники. В связи с этим большое внимание уделяется развитию методов определения оптических характеристик пластин – ширины запрещенной зоны (E_g) и энергии Урбаха (E_u), показателей преломления (n) и поглощения (k). Эти характеристики определяют методами спектрофотометрии и эллисометрии – методами электродинамических моделей. Поскольку число таких моделей не ограничено, то и оптические характеристики, например, кристаллического кремния (cSi) могут не совпадать [1, 2]. Величины (E_g) и (E_u) определяют по коэффициенту поглощения:

$$\alpha \left(\lambda = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \right) \quad (1)$$

на основании экстраполяции Тауца [3] или экстраполяции эмпирической зависимости $\ln [\alpha(E)]$ функцией [4]

$$f(E) = \ln \left\{ \alpha \left(\frac{1240}{E_g} \right) \exp \left[\frac{E - E_g}{E_u} \right] \right\}, \quad (2)$$

в которой $E = 1240 \lambda^{-1}$ – энергия фотона в эВ (λ в нм). Величина E_u характеризует совершенство кристаллической структуры полупроводника.

В [5–9] разными физическими методами установлено, что толщина поверхностного слоя диоксида кремния (SiO_2) на пластинах КДБ-12 после физико-химической обработки ~1.75 нм. Так как при определении оптических констант подложек учесть такие слои можно, а исключить их влияние затруднительно, то на практике иногда рассматривают упрощенную электродинамическую модель, в которой подложка считается однородной. В этом частном случае существует аналитическое определение функций $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ по измеренным при определенном угле падения (θ) эллисометрическим углом, или отражательным ($R(\theta, \lambda)$) и пропускательным ($T(\theta, \lambda)$) способностям [10]

$$\begin{aligned} n(\lambda) &= \sqrt{\sin^2 \theta + \left[(1 + \sqrt{\rho}) (1 - \sqrt{\rho})^{-1} \cos \theta \right]^2}, \\ k(\lambda) &= -\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta} \left(4\pi \lambda^{-1} n(\lambda) D \right)^{-1} \ln \left\{ [R(\theta, \lambda) - \rho] [T(\theta, \lambda) \rho]^{-1} \right\}, \\ \rho &= -0.5F - \sqrt{0.25F^2 - R(\theta, \lambda)[2 - R(\theta, \lambda)]^{-1}}, \end{aligned}$$

$$F = \{ [R(\theta, \lambda) - T(\theta, \lambda) - 1] [R(\theta, \lambda) + T(\theta, \lambda) - 1] - 2 \} [2 - R(\theta, \lambda)]^{-1}.$$

В настоящем сообщении основные оптические характеристики кремниевых пластин КДБ-12 определены методами спектрофотометрии отражения и пропускания. Это позволило сравнить их величины с соответствующими величинами оптических характеристик чистого кремния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве образцов использовались пластины кремния КДБ-12 ($N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\rho = 12 \text{ }\Omega \text{ см}$) ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 100 мм, полученные по методу Чохральского. Обе поверхности пластин подвергали физико-химической обработке. Толщина пластин $D = 0.047 \text{ см}$. На спектрофотометре PHOTON RT (EssentOptics, Belarus) измеряли их отражательные (R_s, R_p) и пропускательные (T_s, T_p) способности s и p поляризованного света при углах падения (θ), равных 10° (рис. 1), 40° и 70° в спектральной области от 200 нм (6.2 эВ) до 1600 нм (0.78 эВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены экспериментальные спектры отражательных и пропускательных способностей пластины КДБ-12 для s поляризованного света, измеренные при угле падения 10° . Край полос собственного поглощения полупроводника приходится на длину волны 947 нм (1.316 эВ).

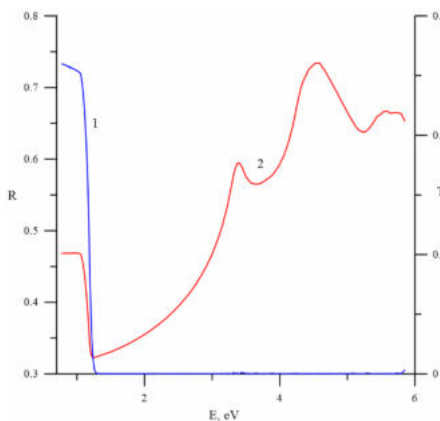


Рис. 1. Пропускательные (1) и отражательные (2) способности пластины КДБ-12

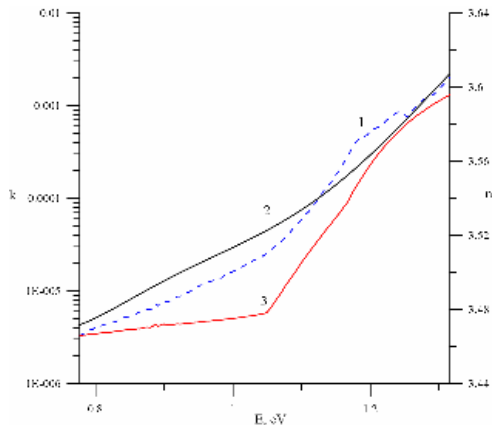


Рис. 2. Показатели преломления (1, 2) и поглощения (3) пластины КДБ-12 (1, 3) и кремния (2) [1]

Для расчетов спектров показателей преломления и поглощения в области $E < 1.32 \text{ эВ}$ (рис. 2) использовали формулы (3). Заметное отличие кривых 1 и 2 наблюдается в области $0.78 \text{ эВ} < E < 1.25 \text{ эВ}$. В этой области чистый кремний считается прозрачным материалом [1].

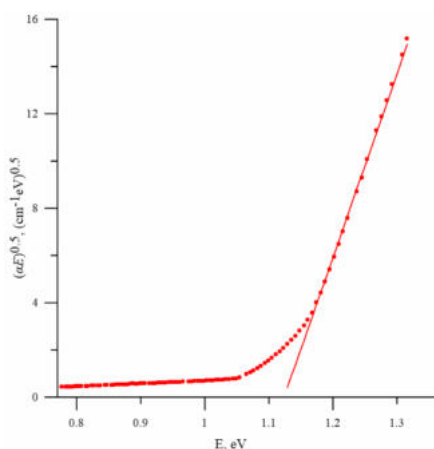


Рис. 3. Определение величины E_g с помощью интерполяции Тауца

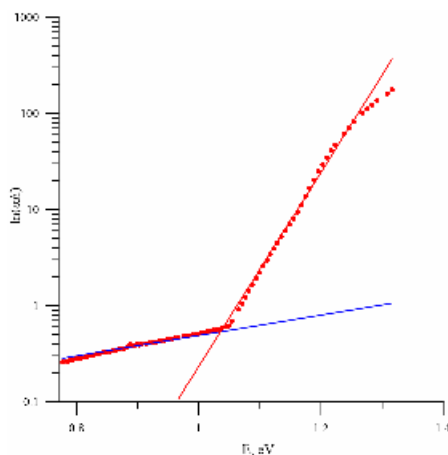


Рис. 4. Определение величин E_g и E_u пластин КДБ-12

Для определения ширины запрещенной зоны исследуемого полупроводника по (1) с использованием спектра k рассчитывали спектр α в см^{-1} . Методика определения E_g из работы [3] основана на выборе такого показателя m в формуле $(\alpha \cdot E)^m$, чтобы на экспериментальной зависимости получить наиболее длинный линейный участок. На рисунке 3 приведена функция Тауца для $m = 0.5$. В таком случае поглощение света приводит к непрямым электронным переходам из валентной зоны в зону проводимости.

Интерполяция участка Тауца на экспериментальной зависимости $(\alpha \cdot E)^{0.5}$ линейной функцией $B(E - E_g)$ позволяет получить общепринятую для кристаллического кремния величину $E_g = 1.12 \text{ eV}$. На экспериментальной зависимости $\ln [\alpha(E)]$ (рис. 4) можно выделить два линейных участка, интерполяция которых функцией (2) позволяет получить $E_{g1} = 1.12 \text{ eV}$, $E_{u1} = 0.42 \text{ eV}$ и $E_{g2} = 1.06 \text{ eV}$, $E_{u2} = 0.04 \text{ eV}$. Мы предполагаем, что параметры E_{g1} и E_{u1} относятся к кристаллическому кремнию, а параметры E_{g2} и E_{u2} характеризуют КДБ-12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее полученные формулы для отражательной и пропускательной способности плоскопараллельной однородной пластины позволяют аналитически определить показатели преломления и поглощения полупроводниковой пластины с ультратонкими поверхностными слоями в области края полос собственного поглощения. Уменьшение величины запрещенной зоны при легировании бором обусловлено расположением акцепторных уровней примеси в запрещенной зоне кремния около потолка валентной зоны. Уменьшение энергии Урбаха при легировании кремния бором может быть вызвано дефектами кристаллической решетки кремния при внедрении бора.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Palik, E.D. Handbook of Optical Constants of Solids / E.D. Palik. - Academic press, 1985. - 1086 p.
2. Green, M. A. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K / M. A. Green, M. J. Keevers //Progress in Photovoltaics: Research and applications. - 1995. - Т. 3. - №. 3. - С. 189–192.
3. Tauc, J. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium / J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vancu //physica status solidi (b). - 1966. - Т. 15. - №. 2. - С. 627–637.
4. Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium-and ytterbium-doped BaTiO₃ film structures and the target form / N. V. Gaponenko [et al.] //Photonics. - MDPI, 2023. - Т. 10. - №. 4. - С. 359.
5. Спектральная эллипсометрия как метод изучения влияния быстрой термообработки кремниевых пластин на их оптические характеристики / В. А. Солодуха [и др.] // Приборы и методы измерений. - 2022. - Т. 13. - №. 3. - С. 199–207.
6. Variation of the silicon optical parameters after rapid heat treatment / В. М. Анищик [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. - 2021. - №. 3. - С. 81–85.
7. Солодуха, В. А. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии / В. А. Солодуха, А. И. Белоус, Г. Г. Чигирь // Наука и техника. - 2016. - №. 4. - С. 329–334.
8. Влияние быстрой термообработки на оптические параметры кремния / В. А. Солодуха [и др.] // Современные информационные и электронные технологии. - 2017. - Т. 1, № 18. - С. 73.
9. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко [и др.] // Доклады национальной академии наук Беларуси. - 2018. - Т. 62. - №. 3. - С. 347–352.
10. Spectrophotometry of Layers on Plane Parallel Substrates / Sotsky A. B. [et al.] //Optics and Spectroscopy. - 2020. - Т. 128. - С. 1155–1166.

ФОТОДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ ТИОИОДИДА ВИСМУТА

Е. А. Стрельцов¹, А. И. Кулак², А. В. Мазаник^{3,4}, И. А. Свито⁴

¹⁾ Белорусский государственный университет, химический факультет,
пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: streltea@bsu.by

²⁾ Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси,
Сурганова 9/1, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: kulak@igic.bas-net.by

³⁾ Институт энергетики НАН Беларуси, Академическая 15/2, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: mazanikalexander@gmail.com

⁴⁾ Белорусский государственный университет, физический факультет,
пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: Ivansvito184@gmail.com

Предложен фотоэлектрохимический детектор на основе тииодида висмута BiSI, имеющего ширину запрещенной зоны $E_g=1,59$ эВ (прямые оптические переходы). Тииодид висмута был синтезирован одностадийным методом химического осаждения на подложки, покрытые проводящим слоем FTO. Структура пленок BiSI представляет совокупность случайно ориентированных игольчатых монокристаллов. Зарождение и рост игольчатых монокристаллов BiSI из единственного центра и, соответственно, отсутствие межкристаллитных границ обеспечивает высокую квантовую эффективность фототока – до 52 % на длине волны 400 нм, что соответствует ампер-