

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ БРЭГГОВСКИЙ ОТРАЖАТЕЛЬ С ПОГЛОЩАЮЩИМИ СЛОЯМИ

© В.В.Евстropов, М.А.Калитеевский, А.Л.Липко,
М.А.Синицын, Б.В.Царенков, Ю.М.Шерняков, Б.С.Явич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 марта 1995 г. Принята к печати 20 марта 1995 г.)

Исследована многослойная гетероструктура, состоящая из брэгговского отражателя на основе GaAs/AlAs и покровного слоя GaAs. Собственно брэгговский отражатель представлял собой 10 пар чередующихся слоев GaAs и AlAs с толщинами 45 и 60 нм, соответствующими расчетному спектральному положению максимума основной полосы отражения с центром при $\lambda_0 = 710$ нм. Излучение с этой длиной волны сильно поглощается в GaAs и не поглощается в AlAs.

Установлено экспериментально и показано теоретически, что наличие на таком поглощающем брэгговском отражателе покровного слоя GaAs с оптической толщиной, отличной от $\lambda_0/4$, приводит к появлению глубокого провала в области основной полосы отражения. Спектральное положение провала зависит от толщины покровного слоя и, если оптическая толщина покровного слоя равна половине длины волны, то провал расположен в центре основной полосы отражения. В случае равенства оптической толщины покровного слоя четверти длины волны провал в основной полосе отражения отсутствует.

1. Полупроводниковые брэгговские отражатели представляют собой гетероструктуры с периодически повторяющимися парами слоев (например, GaAs и AlAs) с разными показателями преломления n_1 и n_2 и толщинами d_1 и d_2 , удовлетворяющими четвертьволновому условию

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4. \quad (1)$$

Они используются в поверхностно-излучающих лазерных диодах [1], светодиодах [2], солнечных элементах [3] и других приборах.

Достаточно хорошо изучены гетероструктурные отражатели, у которых четвертьволновые слои не поглощают излучение в области основной полосы отражения. Коэффициент отражения в таких непоглощающих отражателях при достаточно большом числе пар слоев достигает значений, близких к 100%: так, брэгговский отражатель на основе GaAs/AlAs, рассчитанный на длину волны 980 нм, имеет коэффициент отражения 99.5% [4].

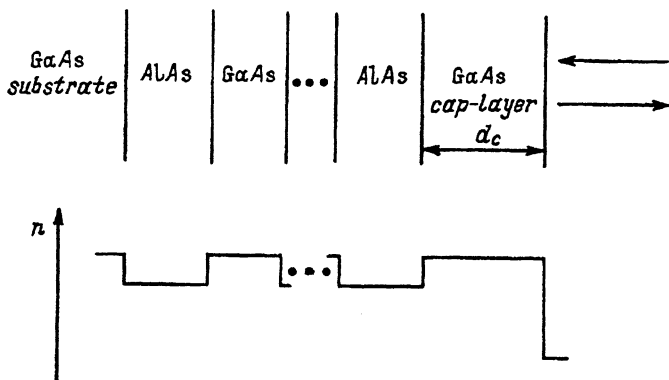


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры и координатная зависимость показателя преломления n .

Однако в ряде случаев приходится использовать отражательные структуры с заметным поглощением излучения в области основной полосы отражения. К ним относятся, в частности, отражатели на основе гетероструктур GaAs/AlAs, предназначенные для зеленой области спектра [5]. К тому же оптоэлектронные приборы помимо собственно брэгговского отражателя, как правило, содержат еще и другие слои, оптическая толщина которых отлична от $\lambda_0/4$. Наличие таких слоев, как нам представлялось, должно приводить к существенным изменениям отражательных свойств структур.

Цель данной работы — выяснить особенности отражательных свойств структуры, содержащей поглощающий брэгговский отражатель и покровный слой, оптическая толщина которого отлична от четвертьволновой.

2. Объектами экспериментального исследования были многослойные гетероструктуры GaAs/AlAs, выращенные методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) на подложках GaAs, состоящие из собственно брэгговского отражателя и покровного слоя GaAs (рис. 1).

Собственно брэгговский отражатель представлял собой 10 пар чередующихся слоев GaAs и AlAs с толщинами 45 и 60 нм, соответствующими расчетному спектральному положению полосы отражения с центром при $\lambda_0 = 710$ нм. Излучение с этой длиной волны сильно поглощается в GaAs и не поглощается в AlAs. Первоначальная толщина покровного слоя GaAs составляла 115 нм. Все слои легировались Si до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщины слоев брэгговского отражателя определялись рентгено-дифракционным методом с погрешностью 2%.

Измерялись спектры отражения структуры в зависимости от толщины покровного слоя при нормальном падении света и комнатной температуре. Толщина покровного слоя пошагово уменьшалась анодным окислением с последующим травлением слоя окисла.

3. Экспериментальные результаты изучения отражательной способности поглощающего брэгговского отражателя с покровным слоем различной толщины d_c сводятся к следующему.

Спектры отражения представляют собой осциллирующие кривые, в которых выделяется основная полоса отражения с центром вблизи $\lambda_0 = 710$ нм и шириной около 150 нм (рис. 2, 3).

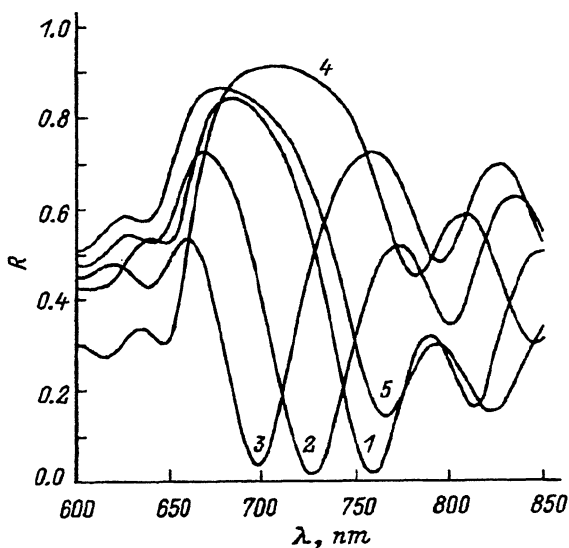


Рис. 2. Экспериментальные спектры отражения исследуемой структуры при толщинах покровного слоя d_c , нм: 1 — 115, 2 — 102, 3 — 89, 4 — 48, 5 — 22.

Главная особенность отражательных свойств структуры — глубокий провал в основной полосе спектра отражения.

Спектральное положение этого провала зависит от толщины покровного слоя d_c (рис. 4) и характеризуется тем, что:

— если оптическая толщина покровного слоя близка к $\lambda_0/2$, то провал расположен в центре полосы отражения (рис. 2, кривая 2);

— если оптическая толщина покровного слоя близка к $\lambda_0/4$, то провал в пределах основной полосы отражения отсутствует, и спектр принимает вид, характерный для брэгговского отражателя; при этом

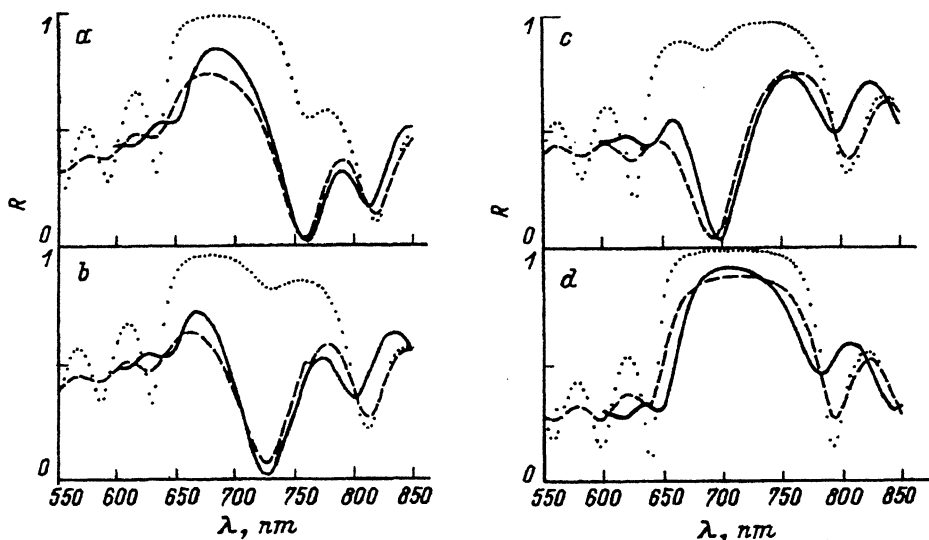


Рис. 3. Экспериментальные (сплошные кривые) и расчетные без учета поглощения (точечные) и с учетом поглощения (штриховые) спектры отражения структуры с различной толщиной покровного слоя d_c , нм: а — 115, б — 102, с — 89, д — 48.

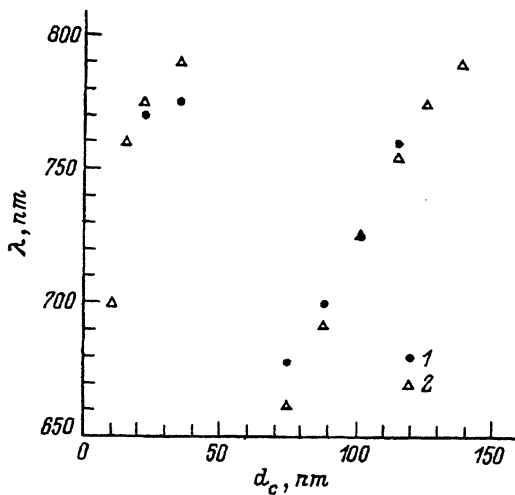


Рис. 4. Спектральная зависимость положения провала в основной полосе отражения от толщины покровного слоя d_c . 1.— эксперимент, 2 — расчет.

коэффициент отражения в максимуме основной полосы близок к 90% (рис. 2, кривая 3);

— когда в результате травления оптическая толщина покровного слоя уменьшается на величину, равную $\lambda_0/2$, то спектральное положение провала совпадает с первоначальным (рис. 2, кривые 1 и 5).

4. Для объяснения такого поведения спектров отражения (возникновение провала, его спектральное положение и исчезновение) мы использовали подход [6], суть которого в построении характеристической матрицы слоистой среды.

Характеристическая матрица каждого слоя в случае нормального падения света имеет вид

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos(K_0\sqrt{\varepsilon_j}d_j) & (-i/\sqrt{\varepsilon_j}) \sin(K_0\sqrt{\varepsilon_j}d_j) \\ -i\sqrt{\varepsilon_j} \sin(K_0\sqrt{\varepsilon_j}d_j) & \cos(K_0\sqrt{\varepsilon_j}d_j) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где K_0 — волновой вектор света в воздухе, d_j и ε_j — толщина и диэлектрическая проницаемость каждого слоя. Характеристическая матрица всей структуры есть произведение характеристических матриц слоев \hat{M}_j :

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} = \prod_j \hat{M}_j. \quad (3)$$

Коэффициент отражения \hat{R} находится как

$$R = \left| \frac{(M_{11} + M_{12}\sqrt{\varepsilon_l})\sqrt{\varepsilon_l} - (M_{21} + M_{22}\sqrt{\varepsilon_l})}{(M_{11} + M_{12}\sqrt{\varepsilon_l})\sqrt{\varepsilon_l} + (M_{21} + M_{22}\sqrt{\varepsilon_l})} \right|^2, \quad (4)$$

где ε_1 и ε_l — диэлектрические проницаемости двух полубесконечных сред, прилегающих к противоположным границам структуры (воздух-покровный слой и брэгговский отражатель-подложка GaAs соответственно).

Для GaAs в рассматриваемом спектральном диапазоне имеет место существенная дисперсия показателя преломления n_{GaAs} и коэффициента поглощения α_{GaAs} [7], причем α_{GaAs} достигает величины порядка 10^4 см^{-1} . В этом случае диэлектрическая проницаемость GaAs представляет собой комплексную величину, так что

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\sqrt{\varepsilon_{\text{GaAs}}}) &= n_{\text{GaAs}}, \\ \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon_{\text{GaAs}}}) &= \alpha_{\text{GaAs}}/2K_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для AlAs поглощение в этом спектральном диапазоне мало, а показатель преломления n_{AlAs} практически не меняется [7], вследствие чего для AlAs можно пренебречь мнимой частью диэлектрической проницаемости и принять $\sqrt{\varepsilon_{\text{AlAs}}} = 2.98$.

5. Расчет спектров отражения, сделанный как с учетом поглощения в GaAs, так и в пренебрежении им, показал следующее.

Наличие покровного слоя с оптической толщиной, отличной от $\lambda_0/4$, как при учете поглощения, так и без такого учета, приводит к появлению провала в основной полосе отражения (рис. 3, *a-c*). Спектральное положение провала зависит от толщины покровного слоя. Расчетная глубина провала при учете поглощения существенно больше, чем без такого учета (рис. 3). Провал отсутствует в случае, когда оптическая толщина покровного слоя равна $\lambda_0/4$ (рис. 3, *d*).

6. Сравнение эксперимента с расчетом показало совпадение спектральных положений провала. При этом спектры, рассчитанные с учетом поглощения, практически полностью совпадают с экспериментальными.

Несоответствия расчетных и экспериментальных осцилляций малой амплитуды в коротковолновой области спектра (на рис. 3 слева от полосы отражения) могут быть обусловлены неучтенной дисперсией показателя преломления в этой области спектра.

7. Появление глубокого провала в основной полосе отражения структуры (собственно брэгговский отражатель+покровный слой) есть следствие как уменьшения коэффициента отражения самого отражателя из-за поглощения в его слоях, так и наличия покровного слоя с толщиной, отличной от $\lambda_0/4$. Это достаточно наглядно поясняется, если коэффициент отражения структуры выразить не формулой (4), а в ином виде [6],

$$R = \left| \frac{r_c + r_b \exp(i\phi)}{1 + r_c r_b \exp(i\phi)} \right|^2, \quad (6)$$

где r_c и r_b — амплитудные коэффициенты отражения на границах воздух-покровный слой и покровный слой-брэгговский отражатель, ϕ — изменение фазы световой волны при движении от границы воздух-покровный слой до границы покровный слой-брэгговский отражатель и обратно. Когда r_b близко к единице, то и R близко к единице. Если же r_c и $r_b \exp(i\phi)$ близки по модулю и противоположны по знаку, то R близко к нулю, т. е. имеет место глубокий провал в полосе отражения.

Итак, установлено, что в основной полосе отражения структуры, состоящей из поглощающего брэгговского отражателя на основе GaAs/AlAs и покровного слоя GaAs с оптической толщиной, отличной от $\lambda_0/4$, имеется глубокий провал; спектральное положение провала определяется толщиной покровного слоя.

Авторы приносят глубокую благодарность Г.В. Царенкову и Б.И. Резникову за участие в работе на ее начальном этапе, а также Н.Н. Фалееву за проведение рентгено-дифракционных измерений.

Список литературы

- [1] A. Von Lehmen, T. Banwell, L. Carrion, N. Stoffel, L. Florez, J. Haribson. *Electron. Lett.*, **28**, 21 (1992).
- [2] T. Saka, M. Hirotsu, T. Kato, H. Susawa. *J. Appl. Phys.*, **73**, 380 (1993).
- [3] V.M. Andreev, V.V. Komin, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts. *Proc. the First World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (1994).
- [4] L.A. Coldren, R.S. Geels, S.W. Corzin, J.W. Scott. *Opt. Quant. Electron.*, **24**, S105 (1992).
- [5] D.B. Young, D.I. Babic, S.P. Den Baars, L.A. Coldren. *Electron. Lett.*, **24**, 1873 (1992).
- [6] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., 1973).
- [7] Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах* (М., 1981) т. 1.

Редактор Л.В. Шаронова

Light absorbing semiconductor Bragg reflector

*V.V. Evstropov, M.A. Kaliteevski, A.L. Lipco, M.A. Sinitsyn,
B.V. Tsarenkov, Yu.M. Shernyakov, B.S. Yavich*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

GaAs/AlAs Bragg reflector coated with GaAs cap-layer has been investigated. The Bragg interference condition has been satisfied at wavelength 710 nm. At this wavelength the absorption coefficient of GaAs is about 10^4 cm^{-1} . The presence of a GaAs cap-layer with an optical thickness other than of a layer constructing the Bragg reflector results in the appearance of a deep minimum inside the reflection band.
