Диэлектрические высокоотражающие зеркальные покрытия для квантовых каскадных лазеров с длиной волны излучения 4–5 мкм

К.А.Подгаецкий, А.В.Лобинцов, А.И.Данилов, А.В.Иванов, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, Д.В.Чистяков, А.В.Бабичев, Г.М.Савченко, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, А.Г.Гладышев, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, А.Ю.Егоров, Г.С.Соколовский

Проведен расчет диэлектрических зеркал для квантовых каскадных лазеров среднего ИК диапазона. Подобраны оптимальные материалы диэлектриков для минимизации поглощения лазерного излучения. Изготовлены образцы излучающих в спектральном диапазоне 4 – 5 мкм квантовых каскадных лазеров с различными диэлектрическими высокоотражающими зеркальными покрытиями и исследованы их характеристики. Показано, что нанесение на заднюю грань резонатора высокоотражающего покрытия $Si – Si_3N_4$ привело к увеличению выходной оптической мощности исследуемых лазеров на 71% по сравнению с контрольными образцами без покрытий. Использование покрытия $Si – SiO_2$ позволило повысить выходную мощность излучателей на 88%.

Ключевые слова: *квантовый каскадный лазер, высокоотражающие зеркала, выходная мощность, инфракрасный диапазон.*

1. Введение

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ) являются перспективными источниками электромагнитного излучения в среднем ИК диапазоне и находят все расширяющиеся области практического применения, среди которых можно выделить молекулярную спектроскопию, газоанализ, биологию и медицину, связь в открытом пространстве и т.д. [1–3]. Для многих из указанных применений актуальна задача повышения выходной оптической мощности таких излучателей.

Проверенным методом повышения выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров является использование зеркальных высокоотражающих покрытий, нанесенных на одну из граней лазерного резонатора. Однако для ККЛ, излучающих в среднем ИК диапазоне, создание указанных покрытий осложняется выбором материалов, имеющих низкое поглощение в рассматриваемом интервале длин волн.

В то время как при создании полупроводниковых лазеров ближнего ИК диапазона, как правило, используются диэлектрические просветляющие и высокоотражающие оптические покрытия (зеркала), для ККЛ среднего ИК диапазона в качестве высокоотражающих покрытий получили распространение не только диэлектрические, но и металлодиэлектрические покрытия. Так, в работах [4, 5] сообщается об успешном использовании диэлектрических покрытий $Si–SiO_2$ и $Ge–SiO_2$, позволивших увеличить выходную мощность при том же токе накачки. Авторы [6–8] показали, что металлодиэлектрические зеркала из $Y_2O_3–Ti–Au$, $SiO_2–Ti–Au$ и $Si_3N_4–Ti–Au$ также эффективно увеличивают выходную оптическую мощность. Выбор предпочтительного покрытия разными авторами во многом определяется длиной волны излучения ККЛ, освоенными материалами и имеющимися технологиями нанесения оптических покрытий.

В настоящей работе подробно рассмотрен вопрос использования диэлектрических высокоотражающих покрытий при создании ККЛ, излучающих в спектральном диапазоне 4–5 мкм.

2. Экспериментальная часть

Экспериментальные образцы ККЛ изготавливались из многослойной гетероструктуры InGaAs/AlInAs/InP, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии [9, 10].

На всех образцах формировался полосковый контакт шириной 40 мкм, длина резонатора составляла 2–4 мм. Исследованные ККЛ были разделены на три группы, отличающиеся зеркальными покрытиями и длинами резо-

К.А.Подгаецкий, А.В.Лобинцов, А.И.Данилов, А.В.Иванов, М.А.Ладугин. АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1;
e-mail: podgaetskykonstantin@yandex.ru
А.А.Мармалюк. АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; Российский университет дружбы народов, Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6
В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, Д.В.Чистяков, Г.М.Савченко, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, Г.С.Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26
А.В.Бабичев, А.Г.Гладышев. ООО «Коннектор Оптикс», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16, литер Б
И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. Санкт-Петербургский национальный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49
А.Ю.Егоров. Санкт-Петербургский национальный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет им. Ж.И.Алфёрова РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, литер А

Поступила в редакцию 1 марта 2023 г.

натора. Длина резонатора первой группы приборов составляла 2.4 мм, а на их заднюю грань наносилось высокоотражающее покрытие $Si–Si_3N_4$. Длина резонатора второй группы излучателей была 4 мм, а в качестве покрытия использовались слои $Si–SiO_2$. Третья группа приборов была контрольной и не имела оптических покрытий на гранях резонатора, а длины резонатора брались равными длинам резонатора образцов из соответствующих групп. Диэлектрические слои $Si–SiO_2$ наносились методом электронно-лучевого испарения, а слои $Si–Si_3N_4$ формировались методом магнетронного распыления. Количество пар слоев в многослойном покрытии выбиралось для обеспечения коэффициента отражения более 88%.

Монтаж кристаллов ККЛ осуществлялся на медный теплоотвод. Выходные характеристики лазеров изучались в импульсном режиме генерации (частота следования импульсов 11 кГц, длительность импульса ~100 нс) при температуре теплоотвода 20 °C.

3. Результаты и их обсуждение

Перед нанесением зеркальных многослойных покрытий на грани ККЛ проводился расчет их оптических характеристик. В рамках данного исследования все зеркальные покрытия рассчитывались в эквивалентном матричном виде. Суть данного метода состоит в упрощении расчетной процедуры благодаря составлению матриц оптических постоянных, описывающих каждый отдельный слой в многослойном покрытии. В дальнейшем перемножением таких матриц в обратном порядке следования электромагнитной волны можно составить общую характеристическую матрицу многослойного покрытия, элементы которой позволяют найти коэффициенты отражения, пропускания и поглощения рассматриваемого покрытия. Основные математические зависимости, используемые для расчета зеркальных покрытий, представлены ниже [11]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\varphi_j & \frac{\mathrm{i}}{n'_j}\sin\varphi_j \\ \mathrm{i}n'_j\sin\varphi_j & \cos\varphi_j \end{bmatrix},$$

$$M = \prod_{i=1}^{j-1} M_i = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot \ldots \cdot M_{j-1} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix},$$

$$r_0 = \frac{n_0(m_{11} + \mathrm{i}n_\mathrm{m}m_{12}) - (n_\mathrm{m}m_{22} + \mathrm{i}m_{21})}{n_0(m_{11} + \mathrm{i}n_\mathrm{m}m_{12}) + (n_\mathrm{m}m_{22} + \mathrm{i}m_{21})},$$

$$t_0 = \frac{2n_0}{n_0(m_{11} + \mathrm{i}n_\mathrm{m}m_{12}) + (n_\mathrm{m}m_{22} + \mathrm{i}m_{21})},$$

$$R = |r_0|^2, \quad T = \frac{n_\mathrm{m}}{n_0}|t_0|^2, \quad A = 1 - R - T,$$

где φ_j – фазовая толщина j-го слоя; $n'_j = n - \mathrm{i}k$; n – коэффициент преломления материала; k – коэффициент экстинкции; n_0 – показатель преломления воздуха; n_m – показатель преломления материала активной области лазера; r_0, t_0 – амплитудные коэффициенты отражения и пропускания; R, T, A – энергетические коэффициенты отражения, пропускания и поглощения.

Очевидно, что эффективная работа высокоотражающего покрытия в составе ККЛ возможна при условии низкого значения его коэффициента поглощения в рассматриваемом спектральном диапазоне. Следовательно, и материалы, составляющие такое покрытие, должны удовлетворять этому требованию. В настоящей работе в качестве возможных материалов для высокоотражающих диэлектрических покрытий ККЛ среднего ИК диапазона рассмотрены Si, SiO_2, Si_3N_4, Al_2O_3, Y_2O_3 и ZnSe. В первом окне прозрачности расчет проведен для λ = 4.5 мкм, а во втором окне прозрачности – для λ = 8.0 мкм. Значения оптических констант для SiO_2, Si_3N_4 и Al_2O_3 взяты из работы [12], для Si – из [13], для Y_2O_3 – из [14] и для ZnSe – из [15].

Зависимости энергетического коэффициента поглощения от толщины слоя рассматриваемых материалов для указанных длин волн представлены на рис.1. Видно, что использование Y_2O_3 в первом окне прозрачности атмосферы представляется нецелесообразным из-за наличия сильного поглощения. По той же причине из рассмотрения материалов, пригодных для второго окна прозрачности атмосферы, могут быть исключены Al_2O_3, SiO_2 и Si_3N_4. Важно отметить, что Si и ZnSe характеризуются малыми значениями коэффициента поглощения, и соответствующие им кривые на рис.1 практически совпадают с нулевой линией (осью абсцисс).

Из отобранных материалов были образованы пары диэлектриков для использования в составе многослойных высокоотражающих зеркальных покрытий ККЛ, работающих в первом окне прозрачности атмосферы. Далее варьировалось число повторения пар N, чтобы обеспечить получение заданного значения коэффициента отражения многослойного зеркального покрытия. Результаты расчета коэффициента отражения относительно числа пар диэлектриков представлены на рис.2. В расчетах оп-

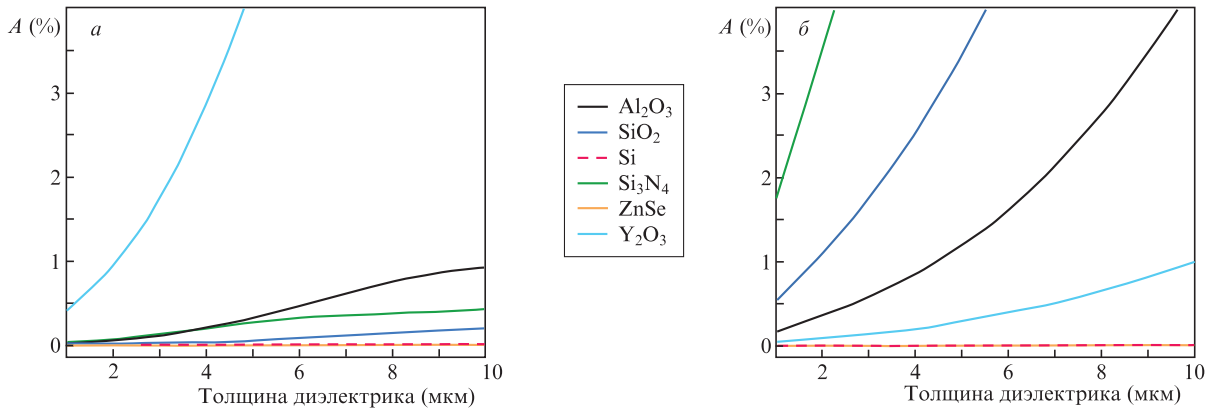

Рис.1. Зависимости энергетического коэффициента поглощения A на длине волны 4.5 (*а*) и 8 мкм (*б*) от толщины слоя материала.

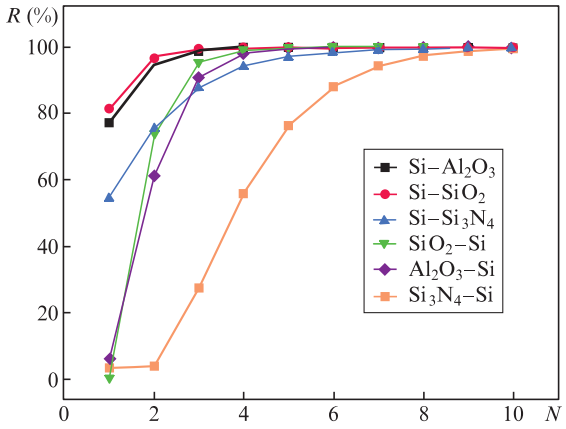

Рис.2. Зависимости коэффициента отражения R от числа пар N диэлектриков в многослойном покрытии на длине волны 4.5 мкм.

тические толщины каждого слоя приняты равными $\lambda/(4n)$, а слои указаны в направлении отраженного электромагнитного излучения.

По результатам расчета коэффициента отражения было решено исследовать образцы ККЛ с зеркальными покрытиями из двух пар $Si–SiO_2$ и трех пар $Si–Si_3N_4$. Расчетное значение коэффициента отражения для первой комбинации диэлектриков составило 97%, а для второй пары – 88%. Ввиду большой толщины многослойного покрытия $Si–Si_3N_4$ при числе пар, равном пяти (толщина составляет ~4 мкм), и высокой вероятности отслаивания такого покрытия было принято решение уменьшить число пар $Si–Si_3N_4$ до трех. Уменьшение числа пар привело к снижению коэффициента отражения с 97.2% до 88%, однако позволило сократить толщину покрытия до 2.4 мкм (для сравнения, у исследованного зеркального покрытия из пар $Si–SiO_2$ толщина составила ~2.3 мкм). Еще одно перспективное по результатам расчета покрытие $Si – Al_2O_3$ нами не исследовалось из-за имеющихся технологических ограничений.

В ходе исследований характеристики приборов с высокоотражающими оптическими покрытиями сопоставлялись с характеристиками приборов без таковых. Результаты такого сравнения мощностных характеристик образцов ККЛ при измерении выходной оптической мощности с одной грани резонатора представлены на рис.3. Отметим, что в эксперименте с зеркалами $Si–Si_3N_4$ длина резонатора образцов была равна 2.4 мм, а в эксперименте с покрытиями $Si–SiO_2$ длина резонатора составила 4 мм. Разница в длинах резонатора объясняет различия между мощностными характеристиками образцов.

Легко заметить, что использование высокоотражающих покрытий позволило снизить пороговый ток для образца с оптическим покрытием $Si–Si_3N_4$ с 2.1 до 1.35 А, а для образца с покрытием $Si–SiO_2$ с 3.44 до 1.82 А. Пиковые значения выходной оптической мощности для образца с $Si–Si_3N_4$ достигали 3 Вт, а для образца с $Si–SiO_2$ – 6 Вт. Нанесение высокоотражающих диэлектрических покрытий привело к увеличению выходной оптической мощности на 71% для покрытия $Si–Si_3N_4$ и на 88% для покрытия $Si–SiO_2$.

Во многих случаях для создания диэлектрических зеркальных покрытий с высоким коэффициентом отражения в среднем ИК диапазоне необходимо использовать покрытия с большой суммарной толщиной. Это может приводить к снижению оптического совершенства зеркал или вовсе к их отслаиванию. В связи с этим в ряде работ (см., напр., [11]) для минимизации суммарной толщины зеркального слоя «жертвуют» коэффициентом отражения. В настоящей работе суммарная толщина покрытия $Si–Si_3N_4$ была уменьшена в 1.6 раза, что привело к снижению коэффициента отражения на 9%.

Авторы [4] продемонстрировали увеличение выходной оптической мощности ККЛ на 53% путем нанесения диэлектрических слоев $Si–SiO_2$, в то время как в настоящем исследовании удалось достичь прироста мощности на 88% при использовании оптического покрытия из таких же материалов.

Другим, хорошо зарекомендовавшим себя подходом для создания высокоотражающих зеркальных покрытий для ККЛ среднего ИК диапазона является использование комбинации диэлектрического слоя с разными металлами [6–8]. Такой подход обусловлен высокими достижимыми значениями коэффициента отражения, простотой создания металлодиэлектрических зеркальных покрытий, минимальной суммарной толщиной последних (относительно диэлектрических покрытий) и будет исследован в отдельной работе.

4. Заключение

Проведен расчет высокоотражающих диэлектрических покрытий, пригодных для использования в качестве зеркал для ККЛ среднего ИК диапазона. Созданы образцы ККЛ, излучающие в спектральном диапазоне 4–5 мкм, с зеркальными покрытиями из $Si–Si_3N_4$ и $Si–SiO_2$. Высокоотражающие диэлектрические покрытия позволили

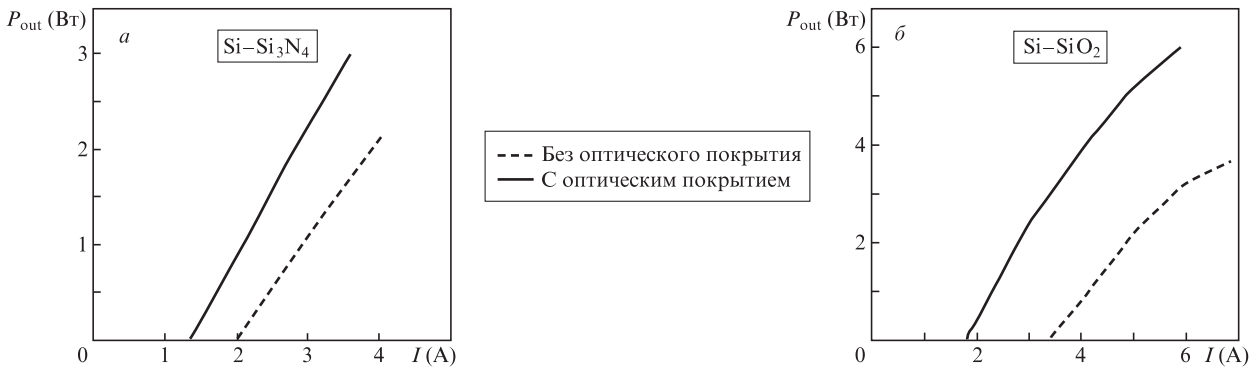

Рис.3. Ватт-амперные характеристики квантовых каскадных лазеров без оптического покрытия и с нанесенным зеркальным покрытием $Si–Si_3N_4$ (*а*) и $Si–SiO_2$ (*б*).

снизить пороговые токи приборов в 1.5–1.9 раза. Получено увеличение выходной оптической мощности ККЛ с исследованными зеркалами на 71%–88% по сравнению с излучателями без оптических покрытий.

Разработка зеркальных покрытий выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (проект № 02.a03.21.0005). Экспериментальные исследования ККЛ проведены при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-30020).

1. Rakić A.D., Taimre T., Lim Y.L., et al. *Appl. Phys. Rev*., **6**, 021320 (2019).
2. Isensee K., Kröger-Lui N., Petrich W. *Analyst*, **143**, 5888 (2018).
3. Абрамов П.И., Бударин А.С., Кузнецов Е.В., Скворцов Л.А. *ЖПС*, **87**, 515 (2020) [*J. Appl. Spectrosc*., **87**, 515 (2020)].
4. Yang Q., Manz C., Bronner Q., et al. *Appl. Phys. Lett*., **90**, 121134 (2007).
5. Bandyopadhyay N., Bai Y., Tsao S., et al. *Appl. Phys. Lett*., **101**, 241110 (2012).
6. Yu J.S., Slivken S., Evans A., Razeghi M. *Appl. Phys. A*, **93**, 405 (2008).
7. Darvish S.R., Slivken S., Evans A., et al. *Appl. Phys. Lett*., **88**, 201114 (2006).
8. Yu J.S., Slivken S., Evans A., Doris L. *Appl. Phys. Lett*., **83**, 2503 (2003).
9. Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Дюделев В.В. и др. *Письма в ЖТФ*, **46**, 35 (2020). [*Techn. Phys. Lett*., **46**, 442 (2020)].
10. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **50**, 720 (2020) [*Quantum Electron*., **50**, 720 (2020)].
11. Furman Sh.A., Tikhonravov A.V. *Basics of Optics of Multilayer Systems* (Gif-sur-Yvette: Frontieres, 2002).
12. Kischkat J., Peters S., Semtsiv M., et al. *Appl. Opt*., **52**, 6789 (2012).
13. Chandler-Horowitz D, Amirtharaj P.M. *J. Appl. Phys*., **97**, 123526 (2005).
14. Kruschwitz J.D.T., Pawlewicz W.T., Semtsiv M. *Appl. Opt*., **36**, 2157 (1997).
15. Qi H., Zhang X., Wang Q., et al. *J. Appl. Spectrosc*., **84**, 679 (2017).