

08.3

Кодирование информации с использованием двухуровневой генерации в лазере на квантовых точках

© М.В. Максимов¹, Ю.М. Шерняков², Н.Ю. Гордеев², А.М. Надточий¹, А.Е. Жуков³

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: maximov@beam.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 23 декабря 2022 г.

Принято к публикации 24 декабря 2022 г.

Предложена схема кодирования и передачи информации, основанная на использовании лазера на квантовых точках, который в зависимости от тока инжекции излучает либо одну из двух, либо одновременно две спектральные компоненты, сильно разделенные по длине волны. При модуляции лазера током каждая линия излучения детектируется независимым фотодиодом, и таким образом информация кодируется как интенсивностью каждой из линий, так и ее длиной волны.

Ключевые слова: лазеры на квантовых точках, двухуровневая генерация, многоуровневое кодирование информации, мультиплексирование с разделением по длине волны.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.05.54664.19450

В настоящее время „двухуровневая модуляция интенсивности с прямым детектированием“ является наиболее широко используемым форматом модуляции для передачи данных. В простой двоичной схеме два сигнала, например два уровня интенсивности лазерного излучения, используются для представления „1“ и „0“. Таким образом, скорость передачи битов равна скорости передачи сигнала. Однако дальнейшее увеличение пропускной способности бинарной схемы сдерживается быстродействием лазеров. Так, например, достигнутый на данный момент уровень частот эффективной модуляции поверхностно-излучающих лазеров на основе вертикального микрорезонатора (VCSEL) составляет ~ 30 GHz и близок к своему пределу [1,2]. Для дальнейшего увеличения информационной емкости оптических каналов с одним передатчиком была предложена многоуровневая модуляция [3], основанная на использовании более чем двух уровней сигнала для представления данных. При этом каждый сигнал соответствует более чем одному биту информации. Например, в случае четырехуровневой схемы группы из двух битов данных („00“, „01“, „10“ и „11“) могут быть представлены четырьмя значениями интенсивности лазерного излучения (0, 1, 2 и 3). Таким образом, каждой паре битов данных соответствует только один уровень оптического сигнала и скорость передачи битов в 2 раза превышает скорость передачи сигнала. Иными словами, увеличение скорости передачи информации происходит не за счет повышения скорости передачи сигнала по каналу, а за счет увеличения информационного содержания каждого сигнала. Однако при этом разница в интенсивностях оптических сигналов оказывается меньше, чем в двухуровневой

схеме, что увеличивает шумы при передаче данных и повышает вероятность ошибок. Данная проблема могла бы быть решена путем увеличения выходной мощности лазера (например, в случае четырехуровневой схемы ее необходимо было бы увеличить в 3 раза). Это, однако, привело бы к перегреву лазера, понижению КПД, росту энергопотребления и сокращению срока службы.

В настоящей работе предложена новая схема кодирования, которая сочетает в себе преимущества многоуровневой передачи сигналов и мультиплексирования с разделением по длине волны за счет использования генерации на двух состояниях в лазерах на квантовых точках.

Пример эволюции спектров генерации многомодового лазера с активной областью на основе квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs/GaAs при увеличении тока инжекции представлен на рис. 1. Необходимо отметить, что процессы переключения лазерной генерации с основного на возбужденное состояние одинаково протекают как для многомодовых, так и для одномодовых лазеров, используемых для передачи информации. При низком уровне накачки лазерная генерация начинается на основном оптическом переходе (ground state, GS) в диапазоне длин волн 1.25–1.3 μm . При дальнейшем увеличении тока в спектре лазерной генерации появляется новая линия, связанная с первым возбужденным оптическим переходом КТ (excited state, ES). Типично эта линия сдвинута в коротковолновую сторону относительно линии, отвечающей основному переходу в КТ, на величину 60–80 nm. Явление двухуровневой генерации в полупроводниковых лазерах на КТ InAs/InGaAs/GaAs было

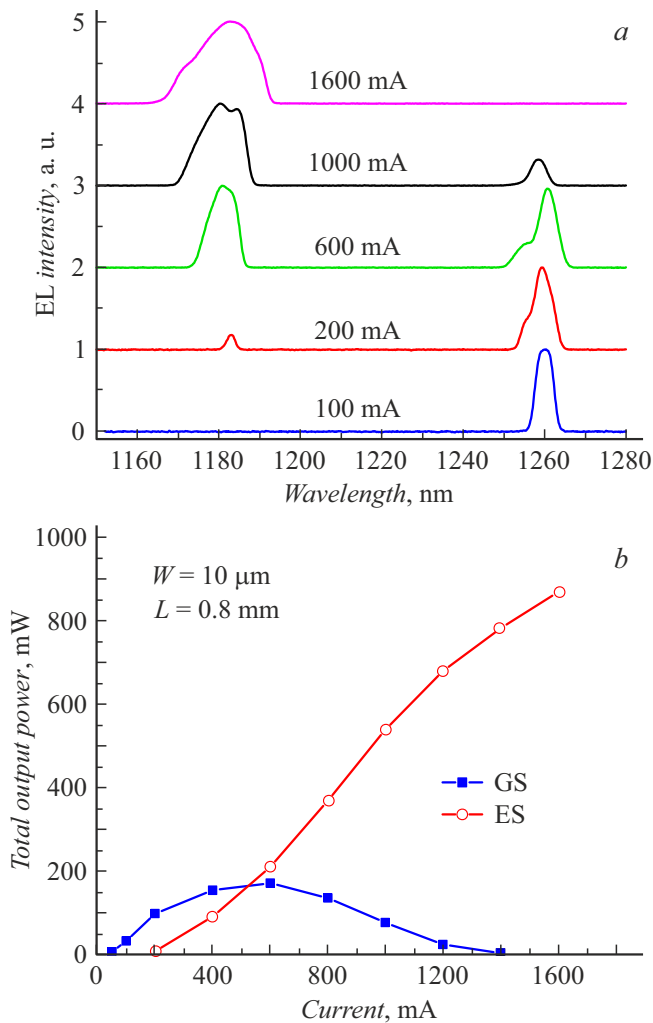


Рис. 1. *a* — спектры генерации в импульсном режиме при различных токах накачки лазера с десятью слоями КТ InAs/InGaAs/GaAs; *b* — зависимости от тока накачки мощности спектральных компонент, соответствующих основному и первому возбужденному состояниям. Ширина полоска $10 \mu\text{m}$, длина резонатора 0.8 mm .

исследовано в ряде экспериментальных и теоретических работ [4–7]. Фундаментальная причина двухуровневой генерации в лазерах на КТ связана с тем, что релаксация электронов с возбужденного состояния на основное является относительно медленным процессом. С ростом уровня накачки время стимулированной рекомбинации может оказаться сравнимым со временем релаксации. Вследствие этого происходит заполнение носителями возбужденного состояния, усиление на нем возрастает и в конечном итоге достигает порогового значения. При дальнейшем увеличении тока наблюдается уменьшение интенсивности линии генерации основного перехода в КТ вплоть до полного ее гашения (рис. 1). Данный эффект был объяснен меньшим темпом захвата дырок в КТ по сравнению с темпом захвата электронов, а также особенностью зонной структуры КТ InAs/InGaAs/GaAs,

а именно близким расположением дырочных уровней в валентной зоне [7]. Необходимо отметить, что в лазерах на квантовых ямах тоже может возникать генерация через возбужденное состояние, однако она наблюдается только при очень больших токах инжекции [8]. В противоположность этому в лазерах на КТ вследствие малой плотности состояний и малого усиления на основном состоянии достаточно быстро происходит его насыщение, что приводит к тому, что генерация на возбужденном состоянии достигается при сравнительно низких плотностях тока.

Предлагаемый способ кодирования данных, основанный на использовании двухуровневой генерации в КТ, проиллюстрирован на рис. 2. В предложенном нами методе информация кодируется как интенсивностью излучения лазера, так и его длиной волны. Лазер модулируется четырьмя уровнями тока инжекции, каждому из которых соответствует свой спектр лазерной генерации. Паре битов (0,0) отвечает ток накачки, немного превышающий порог генерации для основного состояния КТ (GS), при котором интенсивность излучения на данном состоянии мала (аналогично случаю стандартного NRZ-кодирования). Паре битов (0,1) соответствует ток инжекции, при котором интенсивность генерации на основном состоянии максимальна, но генерация на возбужденном состоянии (ES) еще не началась. Паре битов (1,1) поставлен в соответствие ток, при котором интенсивности основного и возбужденного состояний примерно одинаковы. И наконец, паре битов (1,0) соответствует генерация только на возбужденном состоянии. Выходное излучение вводится в оптическое волокно и выводится из Y-образного разветвителя на два фотодиода (рис. 2, *b*). Перед первым фотодиодом находится оптический фильтр, пропускающий излучение основного состояния КТ ($\lambda \sim 1.25\text{--}1.3 \mu\text{m}$), а перед вторым — фильтр, пропускающий излучение возбужденного состояния ($\lambda \sim 1.18\text{--}1.23 \mu\text{m}$). Вместо Y-образного разветвителя и фильтров можно использовать демультиплексор. Поскольку в рамках данного подхода информация кодируется не только интенсивностью, но и длиной волны, детектируемые сигналы в определенном смысле независимы друг от друга. В противоположность этому при стандартном многоуровневом кодировании без возврата к нулю сигнал, соответствующий „1“ для m -уровня, служит „0“ для $(m + 1)$ -уровня, что неизбежно приводит к перекрестным помехам. Поэтому мы ожидаем, что шум и частота битовых ошибок в предложенной многоуровневой схеме могут быть значительно снижены по сравнению с таковыми в обычных схемах многоуровневого кодирования.

Важно отметить, что лазеры на КТ обладают высоким быстродействием, достаточным для коммерческих систем передачи данных. Например, лазеры на КТ InAs/InGaAs/GaAs с длиной волны излучения на основном состоянии $1.3 \mu\text{m}$ продемонстрировали скорость

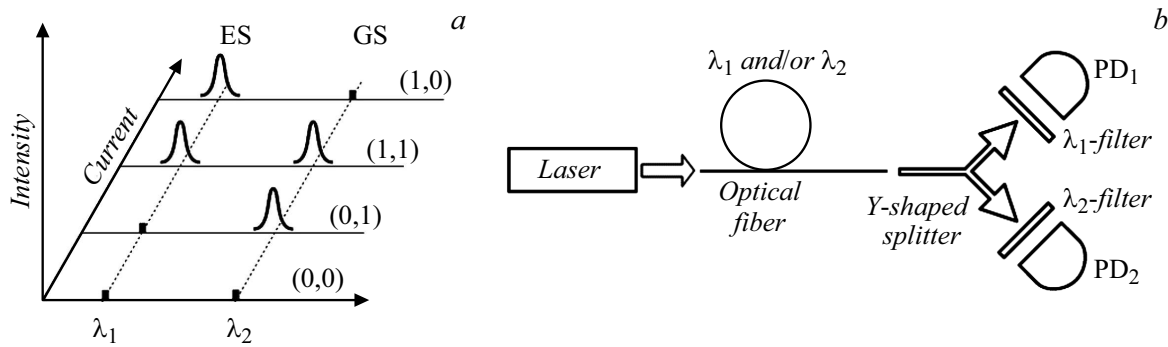


Рис. 2. *a* — схематическое изображение предложенного принципа кодирования информации с использованием двухуровневой генерации в лазерах на КТ; *b* — возможная реализация оптической схемы для многоуровневого кодирования.

передачи данных 25 Gbit/s при использовании традиционной двухуровневой схемы модуляции интенсивности [9]. В случае генерации на возбужденном состоянии было показано [10], что частота модуляции оказывается выше, чем в случае генерации на основном состоянии. Это было объяснено большим значением насыщенного усиления и меньшим временем поступления носителей на возбужденное состояние по сравнению с основным состоянием. В работе [11] было показано, что переключение лазерной генерации в лазерах на квантовых точках InAs/GaAs с основного на возбужденное состояние и обратно под действием коротких импульсов внешней оптической накачки является очень быстрым. Характерное время переключения лазерной генерации с ES на GS составляет 300 ps. Время спада интенсивности генерации на GS после выключения импульса накачки составило 700 ps. Быстрая динамика переключения лазерной генерации между GS и ES будет способствовать реализации высокой скорости передачи информации в предложенном методе кодирования.

Таким образом, в работе предложен новый способ передачи данных, при котором информация кодируется изменением как интенсивности, так и длины волны излучения одного и того же лазера на квантовых точках, модулируемого током. Очевидно, что для практического применения данного метода необходимо уменьшить ток, при котором возникает двухуровневая генерация. Это может быть достигнуто увеличением потерь на выход излучения и/или снижением оптического усиления, например, за счет уменьшения числа КТ в активной области. Предложенный комбинированный метод кодирования с помощью интенсивности и длины волны может быть применен для любых лазеров, излучающих на нескольких длинах волн, воспроизводимое переключение между которыми можно контролировать за счет модуляции спектра излучения током. Данный принцип может быть масштабирован на большее число уровней интенсивности излучения на каждой из двух или более длин волн.

Финансирование работы

Авторы М.В. Максимов и А.М. Надточий благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (проект 0791-2020-0002). Анализ экспериментальных результатов выполнен при поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Блохин, Н.А. Малеев, М.А. Бобров, А.Г. Кузьменков, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, Письма в ЖТФ, **44** (1), 9 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.01.45428.17057 [S.A. Blokhin, N.A. Maleev, M.A. Bobrov, A.G. Kuzmenkov, A.V. Sakharov, V.M. Ustinov, Tech. Phys. Lett., **44** (1), 1 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018010054].
- [2] K. Chi, J. Yen, J. Wun, J. Jiang, I. Lu, J. Chen, Y. Yang, J. Shi, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron., **21** (6), 470 (2015). DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2451015
- [3] N. Kikuchi, IEICE Trans. Electron., **E102.C** (4), 316 (2019). DOI: 10.1587/transele.2018ODI0004
- [4] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, Semicond. Sci. Technol., **18** (8), 774 (2003). DOI: 10.1088/0268-1242/18/8/310
- [5] A. Markus, J.X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, O. Gauthier-Lafaye, Appl. Phys. Lett., **82** (12), 1818 (2003). DOI: 10.1063/1.1563742
- [6] E.A. Viktorov, P. Mandel, Y. Tanguy, J. Houlihan, G. Huyet, Appl. Phys. Lett., **87** (5), 053113 (2005). DOI: 10.1063/1.1995947
- [7] В.В. Корнев, А.В. Савельев, А.Е. Жуков, А.В. Омелченко, М.В. Максимов, ФТП, **47** (10), 1406 (2013). [V.V. Korenev, A.V. Savelyev, A.E. Zhukov, A.V. Omelchenko, M.V. Maximov, Semiconductors, **47** (10), 1397 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613100151].
- [8] D.A. Veselov, K.R. Ayusheva, N.A. Pikhtin, A.V. Lyutetskiy, S.O. Slipchenko, I.S. Tarasov, J. Appl. Phys., **121** (16), 163101 (2017). DOI: 10.1063/1.4982160

- [9] M. Ishida, M. Matsuda, Y. Tanaka, K. Takada, M. Ekawa, T. Yamamoto, T. Kageyama, M. Yamaguchi, K. Nishi, M. Sugawara, Y. Arakawa, in *Conf. on lasers and electro-optics 2012* (Optica Publ. Group, 2012), paper CM11.2. https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2012-CM11.2
- [10] B.J. Stevens, D.T.D. Childs, H. Shahid, R.A. Hogg, *Appl. Phys. Lett.*, **95** (6), 061101 (2009). DOI: 10.1063/1.3193664
- [11] B. Tykalewicz, D. Goulding, S.P. Hegarty, G. Huyet, D. Byrne, R. Phelan, B. Kelleher, *Opt. Lett.*, **39** (15), 4607 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.004607