

3. Татаренко, Н.И. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе /Н.И. Татаренко, В.Ф. Кравченко. –М.: Физматлит, 2006. – 192 с.
4. High aspect ratio silicon etch: A review/ B. Wu, A. Kumar, S. Pamorthy//J. Appl. Phys. – 2010. - Vol. 108, No. 5. – P. 051101.
5. Егоров, Н.В. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы /Н.В. Егоров, Е.П. Шешин. - М.: Интеллект, 2011. – 704 с.
6. Electric potential of a metallic nanowall between cathode and anode planes /X. Qin, W. Wang, Z. Lia // J. Vac. Sci. Technol. – 2011. – Vol. B 29B, No. 3. – P. 031802.
7. Calculation of the local electric field for an infinite array of conducting nanosized objects/ M. Lim[et al.] // J. Phys. A: Math. Theor. – 2007. - Vol. 40, No. 4. - P. 853–862.

МИНИАТЮРНЫЙ МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ НА ЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАВИННЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

А. В. Филимонов¹, В. Е. Земляков², С. Н. Вайнштейн³

¹⁾ Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия,
e-mail: filimonov@rphf.spbstu.ru

²⁾ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия,
e-mail: vzml@rambler.ru

³⁾ CAS group, University of Oulu, Oulu, Finland,
e-mail: vais@ee.oulu.fi

В современных оптических радарах дальнего действия, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне, используются передатчики с импульсной модуляцией на лазерных диодах, способные испускать оптические импульсы пиковой мощностью до 40 Вт продолжительностью 3–10 нс. Скорость современных силовых драйверов обычно ограничена временем переключения таких компонентов переключателя, как полевые транзисторы и лавинные переключатели. В статье показано, что в решении проблемы дальнедействующих радаров дециметрового разрешения играют важную роль не только переключатели, но и паразитная индуктивность в миниатюрной компоновке, а также тип конденсатора.

Ключевые слова: оптические радары; переключение на высокой скорости; лавинные переключатели; миниатюрная компоновка; пиковая мощность.

MINIATURE POWERFUL PULSED NANOSECOND OPTICAL TRANSMITTER ON LASER DIODES USING LAVIN SWITCHES

A. V. Filimonov¹, V. E. Zemlyakov², S. N. Vainshtein³

¹⁾ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia,

²⁾ National Research University of Electronic Technology – MIET, Moscow, Russia,

³⁾ CAS group, University of Oulu, Oulu, Finland

Corresponding author: A. V. Filimonov (filimonov@rphf.spbstu.ru)

In modern long-range optical radars operating in the near infrared range, transmitters with pulse modulation on laser diodes are used, capable of emitting optical pulses with a peak power of up to 40 watts and lasting 3-10 ns. The speed of modern high-current drivers is usually limited by the switching time of switch components such as field effect transistors and avalanche switches. The article shows that not only switches, but also parasitic inductance in miniature configuration play an important role in solving the problem of long-range decimeter resolution radars, as well as the type of capacitor.

Key words: optical radars; switching at high speed; avalanche switches; miniature layout; peak power

ВВЕДЕНИЕ

Для накачки широкополосных лазерных диодов высокой мощности, используемых в лазерных лидарах, необходимо генерировать импульсы тока продолжительностью в несколько наносекунд и амплитудой $\sim 10\text{--}100\text{ А}$ [1, 2]. Наилучшее из доступных решений этой проблемы связано с использованием высоковольтных ($\sim 300\text{ В}$) лавинных транзисторов [3,4] для оптических импульсов продолжительностью 3–10 нс из лазерных диодов мощностью 10–100 Вт. Такая продолжительность оптического импульса становится ограничением для лидаров высокой (дециметровой) точности, если задачей является максимальное увеличение расстояния (до нескольких километров и более). Действительно, диапазон частот принимающих каналов на основе лавинных детекторов на сегодняшний день выходит за пределы 300 МГц, что позволяет обнаруживать оптические импульсы продолжительностью в 1 нс без заметного уменьшения чувствительности детектора. Таким образом, разработка передатчика на лазерных диодах, способного испускать оптические импульсы продолжительностью около 1 нс с как можно более высокой пиковой мощностью, становится важнейшей задачей для дальнодействующих радаров высокой точности, и главная проблема заключается в наносекундных сильноточных драйверах. В принципе, можно реализовать различные режимы усиления и Q-переключения [5, 6]. Эти режимы широко используются в лабораторных условиях и для лазерных передатчиков низкой мощности, однако при серийном производстве появляется проблема нестабильности и невозможности воспроизводства лазерных передатчиков. Главную задачу по оптимизации лазерных передатчиков можно сформулировать следующим образом: продолжительность оптического импульса около 1 нс и как можно более высокая пиковая мощность, что для переключателя тока означает длительность импульса тока около 1 нс и силу тока в несколько десятков ампер. Необходимым условием является миниатюрность компоновки, простота конструкции и низкая стоимость компонентов.

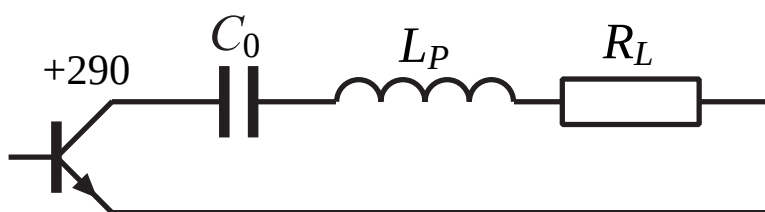


Рисунок 1. – Простейший и эффективный драйвер тока наименьших размеров, который можно реализовать в миниатюрной компоновке.

Переключатель представлен биполярным транзистором, работающим в режиме лавинного пробоя; конденсатор C_0 аккумулирует энергию между импульсами (заряжается) и разряжается через нагрузочный резистор R_L и полную паразитную индуктивность контура схемы L_P . L_P ограничивает нарастание тока; этот контур можно сократить вместе с RL , необходимым только для измерения формы кривой тока (в данном случае $R_L = 1$ Ом).

В оптическом передатчике нагрузочный резистор заменяется лазерным диодом

Приведенная на рис. 1 простейшая схема позволяет достичь минимальной продолжительности и максимальной амплитуды импульса тока для данного электрического переключателя. Эту схему можно использовать в передатчиках, заменив нагрузочный резистор лазерным диодом.

Следующие простые, но достаточно информативные формулы отражают отношения между пиковой амплитудой тока I_m и полной шириной на половине высоты (FWHM) импульса t_w , рассчитанные для «идеального» переключателя с бесконечно малым временем переключения между уровнями U_0 (максимальное напряжение на переключателе) и U_R (остаточное напряжение на переключателе):

$$t_w = 2.2 \times \sqrt{L_P \times C_0} , \quad (1)$$

$$I_m = \frac{U_0 - U_R}{\sqrt{\frac{L_P}{C_0} + R_L}} . \quad (2)$$

При условии, что переключатель идеален ($U_R = 0$, бесконечно малое время переключения), а нагрузочный резистор заменен лазерным диодом с нулевым импедансом, можно вывести следующий «критерий качества» передатчика:

$$I_m / t_w = \frac{U_0}{2.2 \times L_P} . \quad (3)$$

Очевидно, что для дальнодействующих высокоточных радаров, необходим как можно более высокий критерий качества I_m/t_w , и, следовательно, предпочтительным является наибольшее возможное смещение U_0 и наименьшая возможная индуктивность.

Напряжение смещения определяется на основе компромисса между упомянутым критерием, скоростью переключения конкретного транзистора и максимального напряжения, которое допускает для своей системы конкретный пользователь. Паразитную индуктивность L_P во всех случаях следует сокращать, а ее базовый лимит определяется размером компонентов контура, показанного на рис. 1. Естественно, компо-

новка должна быть реализована в виде трехмерной конструкции минимальных размеров, состоящей из полупроводниковых чипов [7].

ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента по исследованию возможности уменьшения продолжительности импульса тока и увеличения амплитуды импульса приведены на рис. 2. Графики отражают результаты вычислений, полученные с использованием формул (1) и (2). Пунктирная кривая сравнивается с результатами экспериментов, полученными при измерениях транзистора FMMT415, непрерывная кривая отражает ожидаемые значения для переключателя с бесконечно малым временем переключения, остаточным напряжением 70 В и индуктивностью в 2,5 нГ.

Эти достаточно приблизительные, но наглядные подсчеты показывают основные ограничения при попытке генерации более коротких импульсов с увеличенной амплитудой. Конечно, в первую очередь требуется уменьшить паразитную индуктивность, внося изменения в компоновку. Далее главным ограничением становится скорость переключения лавинного транзистора [8].

Кривая вычислений для идеального переключателя (с бесконечно малым временем переключения) при $L_p = 5 \text{ нГ}$ отражена пунктирной линией. Она дает несколько большие значения I_m/t_w , но все еще сравнимые с данными эксперимента с FMMT415, а также высокие значения C_0 (с продолжительностью импульса t_w , превышающей 2–3 нс). Это значит, что при времени переключения транзистора, близком к 2 нс, амплитуда и продолжительность импульса тока, приблизительно подсчитанные по формулам (1) и (2), не слишком сильно отличаются от результатов эксперимента, тогда как при более коротких импульсах различия заметно возрастают.

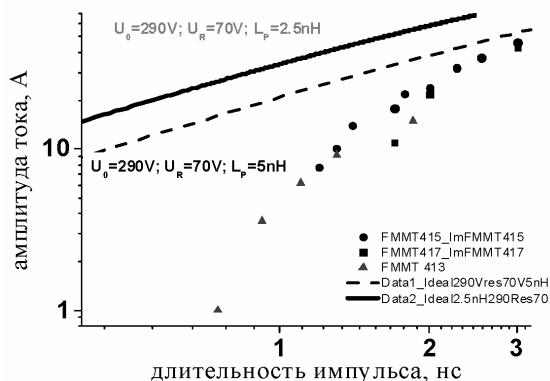


Рисунок 2. – Зависимость пикового тока от продолжительности импульса, измеренная с помощью многослойных керамических конденсаторов NP0 различной емкости, контура с суммарной паразитной индуктивностью в 5 нГ и различных промышленных лавинных транзисторов моделей FMMT 415, 413 и 417 (пр-во Zetex Semiconductors)

Из рис. 2 можно сделать следующие выводы:

1. Промышленный транзистор модели FMMT415 подходит для тех случаев, когда необходимо генерировать импульсы тока продолжительностью более 2 нс, а амплитуду тока можно существенно увеличить путем уменьшения паразитной индуктивности: например, при изменении индуктивности с 5 нГ до 2,5 нГ амплитуда тока увеличивается в 1,5–2 раза (см. непрерывную кривую на рис. 2).

2. Когда необходимо генерировать импульсы тока продолжительностью менее 2 нс, уменьшение индуктивности не влечет за собой существенных положительных изменений. Необходимо разработать особый лавинный переключатель с меньшим временем переключения, чтобы уменьшение значения индуктивности начало давать значительный эффект в отношении тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для того, чтобы добиться значительного увеличения оптической мощности для импульсов длительностью 1 нс, потребуется разработать более быстрый лавинный транзистор и низкоиндуктивную сборку из специально оптимизированных компонентов. При наилучшем стечении обстоятельств можно добиться увеличения пиковой силы тока до ~20 А, что позволит увеличить пиковую мощность соответствующего лазерного диода до ~40 Вт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. A. Biernat and G. Kompa: Powerful picosecond laser pulses enabling high-resolution pulsed laser radar. *J. Optics*, V. 29, pp.225–228 (1998).
2. A. Kilpela and J. Kostamovaara: Laser pulser for a time-of-flight laser radar. *Rev. Sci. Instr.*, V.68, pp. 2253-2258 (1997).
3. W.B. Herden: Application of avalanche transistors to circuits with a long mean time to failure. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, V. IM-25, pp. 152-160 (1976).
4. B.Q. Streetman: *Solid State Electronic Devices*. Englewood Cliffs, Inc, N.J., pp. 344-346, (1972).
5. S.N. Vainshtein and J.T. Kostamovaara: Spectral filtering for time isolation of intensive picosecond optical pulses from a Q-switched laser diode. *Journal of Applied Physics*, V.84, No. 4, pp. 1843–1847 (1998).
6. S. N. Vainshtein, G. Duan, A. V. Filimonov, J. T. Kostamovaara: Switching mechanisms triggered by a collector voltage ramp in avalanche transistors with short-connected base and emitter. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 63, Iss. 8, P. 3044–3048 (2016).
7. Zemlyakov V.E., Egorkin V.I., Vainshtein S.N., Maslevtsov A.V., Filimonov A.: Investigation of electro-physical and transient parameters of energy accumulating capacitors applied in nanosecond and sub-nanosecond high-current avalanche switches. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 9870. P. 731-737 (2016).
8. A.V. Filimonov, V.E. Zemlyakov, V.I. Egorkin, A.V. Maslevtsov, M. C. Wurz and S.N. Vainshtein: Nanosecond miniature transmitters for pulsed optical radars. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 10531. P. 490-497 (2017).