

Quantum state decoherence of an ensemble qubit in a silicon computing cluster

D. A. Podryabinkin, A. L. Danilyuk, V. E. Borisenko
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus

Decoherence rate of an ensemble qubit in the form of isotope ^{29}Si chains in a silicon computing cluster depending on an amount of atoms n in the chain and a degree of coherence M has been calculated. It has been found that the decoherence rate above the relaxation rate of nuclear polarization in the presence of local electronic centre decreases with an increase of the distance from the cluster to the centre. It is shown, that the relaxation rate dominates over the decoherence rate or in lack of electronic centre, or in a case when $n=10$ and the distance to electronic centre is 10 nm.

УДК 628.953.2+537.533

Поведение кварцевых волоконных световодов под действием наносекундного пучка ускоренных электронов

М. Д. Тарасов, О. Н. Петрушин, Ю. А. Савельев, М. Ю. Тараканов, Ю. С. Шигаев
Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской обл., Россия

Пучок электронов с энергией до 400 кэВ, длительностью импульсов на полувысоте 1,5 нс облучает сердцевину кварцевого ступенчатого и градиентного волоконных световодов. Проведено измерение коэффициента потерь света в видимой области спектра путем просвечивания волокна ксеноновой лампой-вспышкой. Показано, что под воздействием ускоренных электронов волокно интенсивно люминесцирует. Доза в 0,01 Гр на длине световода 10 м возбуждает радиолюминесценцию волокна, что приводит регистратор к насыщению и потере полезной информации.

Введение

Кварцевые многомодовые волоконные световоды (ВС) успешно используются для передачи до фотоприемника наносекундных оптических сигналов в видимом [1—3] и ультрафиолетовом [4] диапазонах длин волн. Обычный воздух и ВС можно использовать для регистрации поглощенных доз пучков ускоренных электронов и тормозного излучения [5]. Успешное построение такого метода дозиметрии должно сопровождаться данными как по потерям света в ВС в процессе облучения, так и по радиолюминесценции.

К настоящему времени радиационные дефекты в ВС на длинах волн 0,8—1,3 мкм изучены достаточно подробно [6, 7]. Показано, что ступенчатый

кварц-полимерный ВС на основе чистого SiO_2 более стоек к облучению, чем градиентный, в который для плавного изменения показателя преломления вводят специальные добавки [8]. Согласно данным работы [9] импульсное облучение промышленных градиентных ВС электронным пучком с энергией электронов 0,5 МэВ и дозой 0,36 Мрад при длительности импульса 3 нс приводит к потерям в $2 \cdot 10^4$ дБ/км на длине волны 820 нм, измеренным через 10 мкс после однократного облучения.

Методика исследования

В настоящей работе используются два наиболее распространенных типа многомодовых ВС [10]:

ступенчатый на основе чистого кварца с диаметром проводящей свет сердцевины $d = 200$ мкм, градиентный ВС с $d = 50$ мкм и наружным диаметром кварцевой оболочки 125 мкм.

В качестве источника ускоренных электронов для облучения ВС используется малогабаритный ускоритель, выполненный по схеме [11]. Для выпуска электронов в атмосферу применяется серийная ускорительная трубка типа ИМАЗ-150Э (рис. 1). Электроны с катода проникают через бериллиевый анод. Их энергия за окном трубки составляет 0,4 МэВ. Длительность электронного тока на полувысоте равна 1,5 нс, плотность тока — до 1 кА/см^2 .

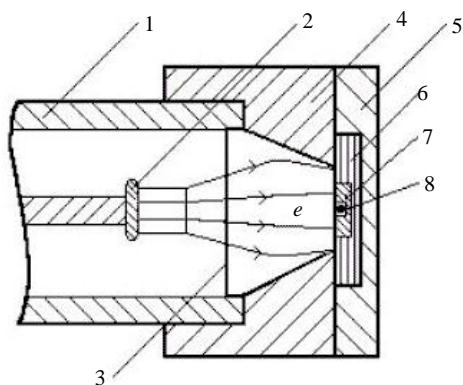


Рис. 1. Способ облучения волоконного световода:

1 — электронная трубка; 2 — катод; 3 — анод; 4 — конус; 5 — кассета; 6 — пленочные дозиметры; 7 — контейнер; 8 — ВС

Для стабилизации электронного пучка используется металлический усеченный полый конус с диаметрами большего и меньшего оснований 20 и 10 мм, соответственно. Высота конуса 10 мм. За выходным окном конуса расположена алюминиевая кассета. В ней закреплены пленочные дозиметры типа ЦДП-Ф2-2 для оценки распределения дозы по сечению пучка и глубине проникновения электронов. Толщина каждого пленочного дозиметра $h = 0,114$ мм, плотность $\rho_f = 1,44 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

В кассете также расположен алюминиевый контейнер с тонким пазом, в котором проложен ВС. В работе исследуются ВС без дополнительной защитной оболочки. На середине толщины ВС средняя доза за один импульс ускорителя у градиентного ВС составляет $(4 \pm 0,8)$ кГр, а у ступенчатого — $(2,3 \pm 0,46)$ кГр на десяти миллиметрах длины ВС.

Для регистрации коэффициента пропускания света одновременно используются два одинаковых ВС (рис. 2). Один облучается с помощью ускорителя. Свет от импульсной ксеноновой лампы-вспышки типа ИФК-120 одновременно подается на оба ВС и попадает на наносекундные ФЭУ типа СНФТ-8М с максимумом чувствительности на длине волны 500 нм в полосе чувствительности 280—730 нм по уровню 0,1. Перед фотокатодом

ФЭУ расположены нейтральные и интерференционные светофильтры. Используются два интерференционных светофильтра с длинами волн в максимуме полос пропускания 487 и 677 нм. Ширина полосы пропускания 15 нм на полувысоте. Лампа-вспышка и ускоритель связаны блоком задержки, который позволяет запускать ускоритель как во время светового сигнала, так и после через любой промежуток времени. Запись сигналов с ФЭУ осуществляется на цифровом осциллографе типа TDS-3034В.

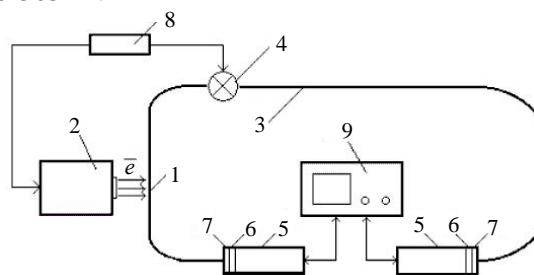
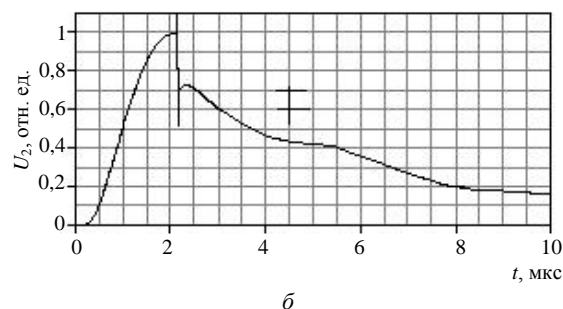
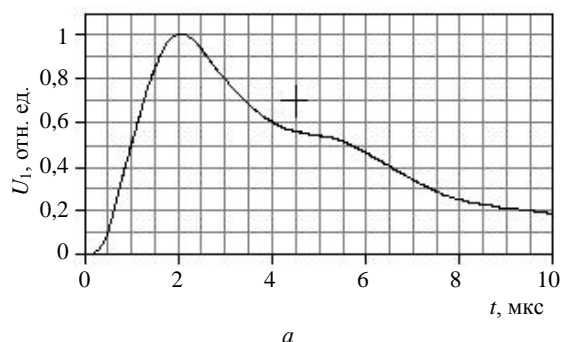


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — облучаемый ВС; 2 — ускоритель; 3 — необлучаемый ВС; 4 — лампа-вспышка; 5 — ФЭУ; 6, 7 — светофильтры; 8 — блок задержек; 9 — осциллограф

Результаты экспериментальных исследований

Пример записи световых сигналов с ВС, когда облучение произошло в максимуме свечения лампы-вспышки, в момент времени 2,2 мкс после начала ее свечения демонстрирует рис. 3.



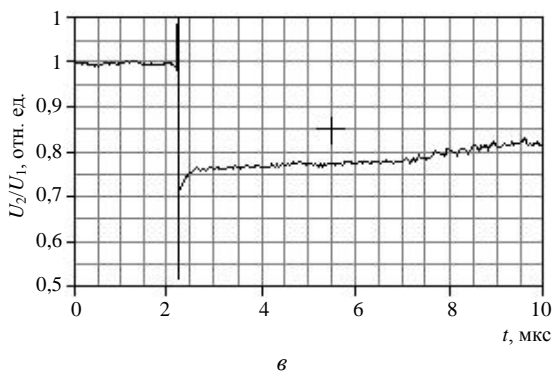


Рис. 3. Осциллограммы световых импульсов, прошедших через градиентный ВС на длине волны 677 нм:

а — прошедший через ВС световой импульс без облучений; б — с облучением; в — отношение амплитуд импульса “б” к импульсу “а”

Во время облучения наблюдается интенсивная люминесценция ВС (на рис. 3 не показана из-за малой продолжительности), “ослепляющая” ФЭУ на несколько наносекунд.

После этого регистрируется существенное уменьшение прозрачности ВС. Как и следовало ожидать, радиационные потери света у градиентного ВС оказались заметно выше, чем у кварц-полимерного. На длине волны 487 нм у градиентного ВС (рис. 4, а) коэффициент потерь света через 10 нс после облучения превысил уровень $K_{loss1}(487) = 19$ дБ/см ($1,9 \cdot 10^6$ дБ/км), являющийся пределом чувствительности методики и поэтому не показан на рис. 4, а. На этой длине волны у градиентного ВС восстановление не наблюдается в течение 4 сут. За это же время коэффициент потерь для всего спектра лампы-вспышки (интегральные потери) уменьшается с $K_{loss1(int)} = 10$ дБ/см (10 нс после облучения) до $K_{loss1(int)} = 5,7$ дБ/см. На длине волны 677 нм потери света оказываются существенно меньшими, и через 10 нс после облучения $K_{loss1(677)} = 5,7$ дБ/см. Через 10 мкс после облучения на этой длине волны коэффициент потерь света составляет $K_{loss1(677)} \approx 3$ дБ/см ($3 \cdot 10^5$ дБ/км), что более чем на порядок превышает коэффициент потерь, полученный в работе [9] на длине волны 820 нм при близких дозах облучения и энергии электронов.

У кварцевого ступенчатого ВС (см. рис. 4, б) коэффициент интегральных потерь света через 10 нс после облучения составляет $K_{loss2(int)} = 1,6$ дБ/см, на длинах волн 487 и 677 нм—соответственно, $K_{loss2(487)} = 1,8$ дБ/см и $K_{loss2(677)} = 1,5$ дБ/см. У этого ВС процесс восстановления прозрачности как в интегральном свете, так и на длинах волн 677 и 487 нм имеет одинаковый вид. Через 1 мкс после облучения в интегральном свете $K_{loss2(int)} = 1,17$ дБ/см, $K_{loss2(487)} = 1,3$ дБ/см, а коэффи-

циент потерь на длине волны 677 нм $K_{loss2(677)} = 0,83$ дБ/см.

Как уже отмечалось, в ВС во время облучения возникает интенсивное свечение. При этом в диапазоне поглощенных в ВС доз $D = 7,5—1700$ Гр ($5 \cdot 10^9—1,1 \cdot 10^{12}$ Гр/с), приходящихся на длину 10-мм ступенчатого ВС при общей его длине $l = 30$ м, возникают световые импульсы с полушириной $t_{0,5} \approx 6$ нс, что заметно больше продолжительности токового импульса (рис. 5). Для того чтобы интенсивность света не выходила за линейный участок чувствительности ФЭУ, в измерениях используются нейтральные светофильтры. На верхней границе диапазона поглощенной дозы импульсный ток с анода ФЭУ без потерь света на этих светофильтрах только за счет радиолоуминесценции ВС мог бы возрасти до 55 А (рис. 6).

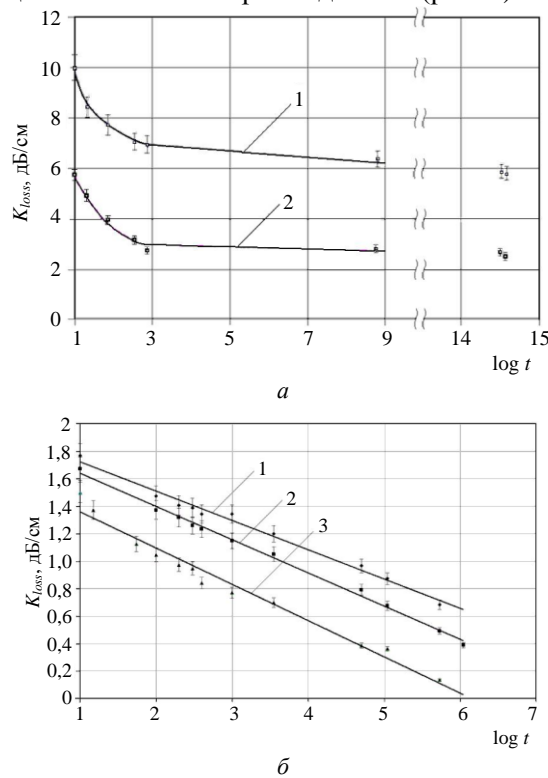


Рис. 4. Временная зависимость восстановления наведенных потерь:

- а — в градиентном ВС, время t в нс:
- 1 — потери света во всем спектре лампы-вспышки;
- 2 — на длине волны 677 нм;
- б — в ступенчатом ВС, время t в нс:
- 1 — потери света на длине волны 487 нм; 2 — во всем спектре лампы-вспышки; 3 — на длине волны 677 нм

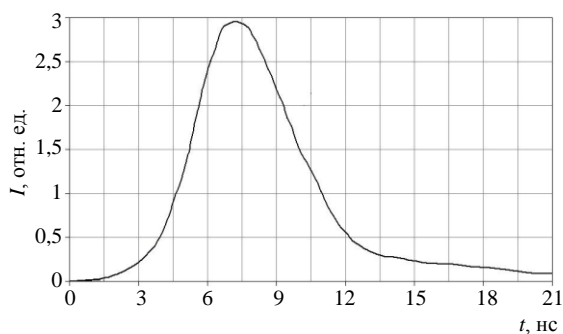


Рис. 5. Осциллограмма светового импульса радиолюминесценции ступенчатого ВС

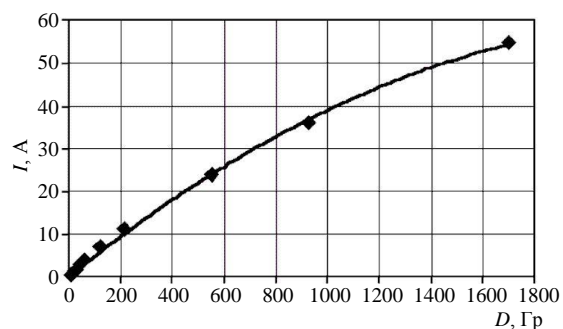


Рис. 6. Зависимость тока с анода ФЭУ от дозы облучения электронным пучком ступенчатого ВС с диаметром сердцевины 0,4 мм:

Длина облучаемого участка 10 мм: \blacklozenge — экспериментальные точки; ———— — полином второй степени

Экспериментальные результаты (см. рис. 6) можно аппроксимировать зависимостью

$$I, A = -10^{-5} \cdot D^2 + 0,0492 \cdot D,$$

где D — средняя доза в сердцевине ВС, Гр.

У ФЭУ типа СНФТ-8М предел линейности анодного тока составляет около 0,5 А.

Из формулы следует, что для получения такого выходного тока на ВС необходимо обеспечить дозу всего лишь $D = 10$ Гр на сердцевине ступенчатого кварц-полимерного ВС длиной 10 мм. В случае увеличения длины до 10 м доза для полного "ослепления" ФЭУ составит всего лишь $D \approx 0,01$ Гр. Подобное свечение под действием излучения было обнаружено и у градиентного ВС с яркостью света, в несколько раз меньшей, чем у ступенчатого ВС, за счет меньшего диаметра проводящей свет сердцевины.

Заключение

Радиационные потери света в градиентном ВС под действием электронов с энергией до 400 кэВ сильно и нелинейно возрастают с уменьшением длины волны от 820 до 487 нм. Дозы $(4 \pm 0,8)$ кГр за импульс продолжительностью $t_{0,5} = 1,5$ нс создает на длине волны света 487 нм коэффициент

потерь, превышающий уровень $K_{loss1(487)} = 19$ дБ/см. Поэтому в радиационных экспериментах с передачей оптических сигналов в видимой области спектра предпочтительней использовать ступенчатые кварц-полимерные ВС из чистого кварца, сокращая по возможности их длину и дозу в облучаемом участке. На ускорителях с большей энергией ионизирующих частиц или квантов за счет повышения вероятности возникновения сложных, не восстанавливаемых дефектов, дозы облучения ВС должны быть существенно меньшими, чем в настоящей работе. Для исключения вклада свечения ВС под действием облучения в результаты оптических измерений в видимой области спектра обычные кварцевые ВС можно использовать в полях импульсного ионизирующего излучения с большой осторожностью. Поэтому для передачи оптических сигналов из зоны облучения сами ВС необходимо удалить из этой зоны и максимально защитить от облучения.

Литература

1. He X., Han C., Kang S.// Proc. Eight Symposium (International) on Detonation, Albuquerque Convention Center. 1985. P. 567—574.
2. Tarasov M. D., Tolshmyakov A. I., Kuznetsov F. O. et al. Detonation and chock-wave temperature measurements with two-color pyrometer based on fiber optics. Proceedings of 22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics// SPIE. 1997. V. 2869. P. 894—899.
3. Tarasov M. D., Карпенко И. И., Судовцов В. А., Толшмяков А. И. О температуре детонационного фронта в пористом ВВ// ФГВ. 2007. № 4. С. 108—110.
4. Tarasov M. D., Эльяш С.Л., Гончарова В.Ф. и др. Эффективность радиолюминесценции воды под действием ускоренных электронов// ПТЭ. 2007. № 5. С. 59—62.
5. Бабич Л. П., Tarasov M. D. Дозиметрия по свечению воздуха// Там же. 2006. № 3. С. 129—137.
6. Лярский В. Ф., Захарченко В. С., Григорьева Н. К. Состояние и тенденции развития волоконно-оптических систем связи// Обзоры по электронной технике. Сер. 10. 1981. Вып. 2. — 44 с.
7. Заитов Ф. А., Литвинов Н. Н., Савицкий В. Г., Средин В. Г. Радиационная стойкость в оптоэлектронике/ Под ред. В. Г. Средина. — М.: Воениздат, 1987. — 167 с.
8. Гроднев И. И., Ларин Ю. Т., Теумин И. И. Оптические кабели. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 264 с.
9. Friebele E. J., Schultz P. C., Gingerich M. E. Compositional effects on the radiation response of Ge - doped Silica - core optical fiber waveguides// Appl. Opt. 1980. V. 19. № 17. P. 2910—2916.
10. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1998. — 504 с.
11. Белкин Н. В., Тараканов М. Ю., Tarasov M. D. Портативный генератор субнаносекундных импульсов быстрых электронов// ПТЭ. 1987. № 6. С. 133—135.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2007 г.

Quartz fiber light-guides under the influence of the nanosecond bunch of the accelerated electrons

M. D. Tarasov, O. N. Petrushin, Yu. A. Savelyev, M. Yu. Tarakanov, Yu. S. Shigaev
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, the Nizhniy Novgorod region, Russia

The bunch of electrons with the energy up to 400 keV, with the pulses duration on the half-height of 1.5 nanoseconds irradiates the core of the quartz step and gradient fiber light-guide. The measurement of the light loss factor in the visible spectral region is carried out by the fibre translucence with the xenon flash-lamp. Under the influence of irradiation the fibre intensively luminesces. The doze of 0.01 Gy on the fiber light-guide length of 10 m leads to the fibre radioluminescence resulting in photomultiplier saturation.