

УДК 535.14+535.33

ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР **В.Г. Беспалов, А.А. Городецкий, Я.В. Грачев, С.А. Козлов, Е.В. Новоселов**

Описан экспериментальный макет и принципы работы импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора. При помощи данного макета получены временные формы отраженного ТГц сигнала от слоистых сред – CD-диск, дискета, зубная ткань. Продемонстрирована возможность подробного изучения структуры диэлектрических слоистых сред при помощи данного метода.

Ключевые слова: терагерцовая оптика, спектроскопия, голография и томография, рефлектометрия.

Введение

Терагерцовая (ТГц) оптика и спектроскопия, а также технологии, использующие наиболее длинноволновый оптический интервал частот, привлекают все больший интерес вследствие широкого использования в научных целях, а также для применений в гражданской и военной технике. Возникновение этого направления связано прежде всего с появлением источников и приемников когерентного ТГц излучения в 70–80 годах XX века [1, 2]. За последующие годы, в связи с развитием фемтосекундных лазеров и микроэлектроники, в исследованиях ТГц области наметился значительный сдвиг. Появились новые методы генерации, управления распространением и детектированием ТГц излучения, написаны первые монографии [3, 4].

Наиболее развиты к настоящему времени методы генерации и детектирования ТГц излучения с использованием импульсных лазеров ближнего ИК-диапазона спектра фемтосекундной длительности [5]. Как правило, в данных методах генерируются ТГц импульсы, состоящие из нескольких колебаний поля длительностью 0,1–10 пс, соответственно спектр излучения представляет собой континуум, простирающийся в отдельных случаях до 0,1–40 ТГц [4]. Методы детектирования с использованием фемтосекундных импульсов ближнего ИК-диапазона спектра позволяют регистрировать непосредственно временную форму электрического поля ТГц импульса, а путем Фурье-преобразования – комплексный спектр излучения, спектры пропускания или отражения веществ, а также диэлектрические проницаемости в данном диапазоне частот [6].

В ТГц области частот наблюдается огромное число спектральных особенностей веществ, энергия ТГц квантов (1 ТГц соответствует 4,1 МэВ) соответствует вращательным переходам молекул, колебательным модам органических соединений, колебаниям решетки в твердых телах, внутризонным переходам в полупроводниках и энергетическим щелям в сверхпроводниках. Импульсная ТГц спектроскопия с разрешением во времени (THz time-domain spectroscopy) позволяет исследовать все вышеперечисленные спектральные особенности.

Отраженное от объекта широкополосное ТГц излучение несет большой объем информации как о его внутренней структуре, так и о спектральных свойствах, однако процессы дифракции и многократного рассеяния на внутренней структуре объекта затрудняют обработку данных и не позволяют сделать однозначный вывод о его строении и составе. В данной работе проведено исследование процесса отражения широкополосного ТГц излучения от различных объектов, включая отражения от их внутренней структуры, а также от слоистых комплексных покрытий, нанесенных на исследуемый образец. Данная методика исследований может рассматриваться как идеальная (неконтактная, неионизирующая, безопасная) технология неразрушающего контроля, обеспечивающая высокое пространственное разрешение как по покрытиям, так и по глубине изделия.

Лабораторный макет для исследований отражения импульсного ТГц излучения от слоистых диэлектрических структур

Для проведения экспериментов по регистрации ТГц сигналов на отражение от слоистых диэлектрических структур был разработан и реализован лабораторный макет (рис. 1).

В оптической схеме лабораторного макета лазерный пучок от фемтосекундного лазера (средняя выходная мощность на длине волны 1040 нм не менее 1,4 Вт, длительность одиночного импульса по полувисоте \approx 150 фс) при помощи светоделительной пластины 1 разделяется на пробный пучок и пучок накачки. Средняя мощность пробного пучка в данной схеме составляет \sim 1% от средней мощности пучка накачки (\sim 10 мВт), и этого вполне достаточно для дальнейшей схемы электрооптического детектирования. Пробный пучок, пройдя систему зеркал 3, попадает на электрооптический кристалл – детектор ТГц излучения. Пучок накачки, пройдя через линию оптической задержки 2 с шаговым двигателем, управляемым с персонального компьютера, с помощью системы зеркал 3 попадает под углом падения 45° на нелегированный полупроводниковый кристалл арсенида индия (InAs), помещенный в постоянное магнитное поле, в котором путем возбуждения фотоносителей и происходит генерация ТГц излучения [7].

Генерируемое ТГц излучение в данной схеме распространяется только в направлении, соответствующем углу отражения от полупроводникового кристалла, поскольку InAs непрозрачен в ТГц области спектра. Кристалл вырезан в плоскости (100) и представляет собой пластину размерами 10×10 мм² и толщиной 100 мкм, причем концентрация основных носителей в кристалле составляла $\sim 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Подвижность электронов – $3 \cdot 10^4$ см²/В·с. Для создания постоянного магнитного поля, параллельного поверхности полупроводникового кристалла, которое наиболее эффективно для генерации терагерцового излучения, кристалл InAs помещался в специально разработанную магнитную систему на основе композита Nd:B:Fe с напряженностью магнитного поля в 1,8 кЭ.

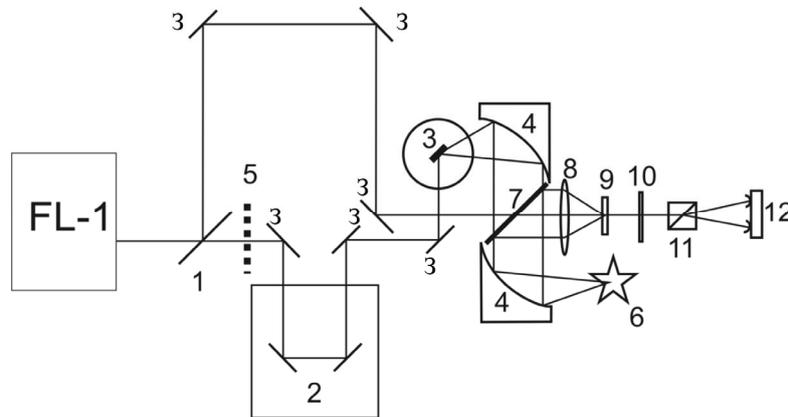


Рис. 1. Оптическая схема измерений отражения ТГц излучения от слоистых диэлектрических структур: FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов на Yb:KYW; 3 – зеркала с $R \approx 100\%$ при падении светового пучка под 45° ; 1 – светоделитель; 2 – оптическая линия задержки; 3 – генератор ТГц излучения на основе кристалла InAs; 4 – 45° -ное параболические зеркала; 5 – оптико-механический модулятор; 6 – объект исследования; 7 – светоделитель ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния; 8 – линза из ТРХ с $f = 5$ см; 9 – электрооптический кристалл CdTe; 10 – ахроматическая четвертьволновая пластинка; 11 – призма Волластона; 12 – балансный детектор

В оптической схеме использовались 45° -ные параболические зеркала 4 с главным фокусом 120 мм и световой апертурой 90 мм. Вычисления показывают, что для длины волны 300 мкм (1 ТГц) и диаметра пятна лазера на кристалле $2r_0 = 500$ мкм на расстоянии 120 мм от генератора ТГц пучок имеет диаметр порядка 80 мм. Генерируемое ТГц излучение коллимировалось первым внеосевым параболическим зеркалом 4, после чего попадало на фильтр из черного тефлона, отсекающий диапазон длин волн, меньших 50 мкм, во избежание прохождения в дальнейший измерительный тракт мощного лазерного пучка, а также на ТГц поляризатор, выделяющий горизонтальную составляющую. В дальнейшем ТГц излучение, пройдя светоделительную пластину из высокоомного кремния 7, фокусировалось вторым внеосевым параболическим зеркалом 4 на исследуемый объект. ТГц излучение, отражаясь от объекта, собиралось тем же вторым внеосевым параболическим зеркалом 4, а после отражения от светоделительной пластины 7 фокусировалось ТГц линзой 8 с фокусом 5 см на электрооптический детектор – кристалл CdTe, вырезанный по направлению [100]. При попадании одновременно пробного пучка фемтосекундного излучения и пучка ТГц излучения на электрооптический кристалл CdTe ТГц импульс в кристалле наводил двулучепреломление для пробного пучка вследствие электрооптического эффекта [4]. Величина двулучепреломления прямо пропорциональна напряженности электрического поля ТГц волны в данной временной точке $E(t)$. С помощью линии оптической задержки 2 изменялось время пересечения ТГц импульса и импульса пробного пучка в кристалле, и дальнейшая схема проводила измерение наведенного двулучепреломления.

Схема измерения двулучепреломления состояла из четвертьволновой пластины 10, призмы Волластона 11, балансного фотодетектора 12 и синхронного нановольтметра, управляемого от оптико-механического модулятора 5, помещенного в пучок накачки. Работа схемы происходила следующим образом. Без ТГц излучения пробный пучок не испытывал двулучепреломления и после прохождения четвертьволновой пластины, превращающей горизонтальную поляризацию пучка в круговую, призмой Волластона разделялся на два пучка с ортогональными поляризациями одинаковой интенсивности. При этом с балансного фотодетектора не регистрировался сигнал. При наведении ТГц импульсом двулучепреломления в пробном пучке после призмы Волластона пучки имеют неодинаковую интенсивность, и с балансного фотодетектора регистрировался сигнал рассогласования, пропорциональный величине двулучепреломления. При изменении поляризации ТГц импульса меняется и знак двулучепреломления, что соответственно вызовет изменение поляризации сигнала с фотодетектора. Таким образом, измеряя при раз-

личных задержках сигнал рассогласования, можно измерить зависимость амплитуды ТГц излучения от времени $E(t)$. Для увеличения соотношения сигнал–шум в схеме используется синхронный нановольтметр, сигнал с которого оцифровывается и подается на персональный компьютер. Одновременно регистрируется величина временной задержки оптической линии, результаты обрабатываются в реальном времени, и на дисплее компьютера рисуется кривая $E(t)$. Как правило, временная форма импульсного ТГц излучения составляет одно полное колебание, а центральная частота его спектра находится в районе 0,5–1,5 ТГц. Фемтосекундный лазер FL-1 с энергией одиночного импульса 13 нДж работает в импульсно-частотном режиме с частотой следования одиночных импульсов порядка 75 МГц. Импульсно-частотный режим генерации позволяет осуществить когерентную генерацию широкополосного ТГц излучения. В данном случае имеется в виду когерентность между любыми ТГц импульсами из частотной последовательности (цуга). Например, при частоте следования возбуждающего фемтосекундного лазера 100 МГц первый и стомиллионный ТГц импульс когерентны между собой, т.е. имеют одну и ту же временную форму, спектр и распределение фаз (идентичный волновой фронт) по сечению пучка. Таким образом, эти импульсы могли бы интерферировать, если задержать второй импульс на 1 с при регистрации в одном и том же месте пространства. Именно данное обстоятельство позволяет осуществлять когерентное электрооптическое детектирование при изменении длины оптической линии задержки. Так как при детектировании терагерцового излучения получаем временную зависимость электрического поля $E(t)$ ТГц импульсов в каждой точке плоскости, можно вычислить опорный комплексный спектр излучения, падающего на образец $E_{оп}(\omega)$, вычислив Фурье-преобразование соответствующей временной последовательности. Поставив на пути ТГц излучения нужный объект, можно измерить измененную временную форму ТГц импульса и комплексный спектр излучения, прошедшего через него, $E_{об}(\omega)$. По двум полученным комплексным спектрам можно вычислить показатель преломления, коэффициент поглощения и дисперсию исследуемой среды [6].

Результаты предварительных экспериментов по регистрации ТГц сигналов на отражение от различных сред

С использованием лабораторного макета (рис. 1) на первом этапе исследований были получены сигналы от алюминиевого зеркала 6 (рис. 2), полностью отражающего приходящий ТГц импульс. Полученная зависимость величины напряженности электрического поля от времени приведена на рис. 2, а, б. Анализ временной зависимости показывает, что генерируемый ТГц импульс на переднем фронте имеет однопериодную структуру (рис. 2, б) (0–3,5 пс) с временной шириной положительного пика по уровню половинной амплитуды около 1 пс. За основной однопериодной структурой следуют переколебания (4–25 пс) значительно меньшей амплитуды, отражающие дисперсионные свойства среды, что в основном связано с наличием в воздухе паров воды и их линий поглощения в ТГц диапазоне частот.

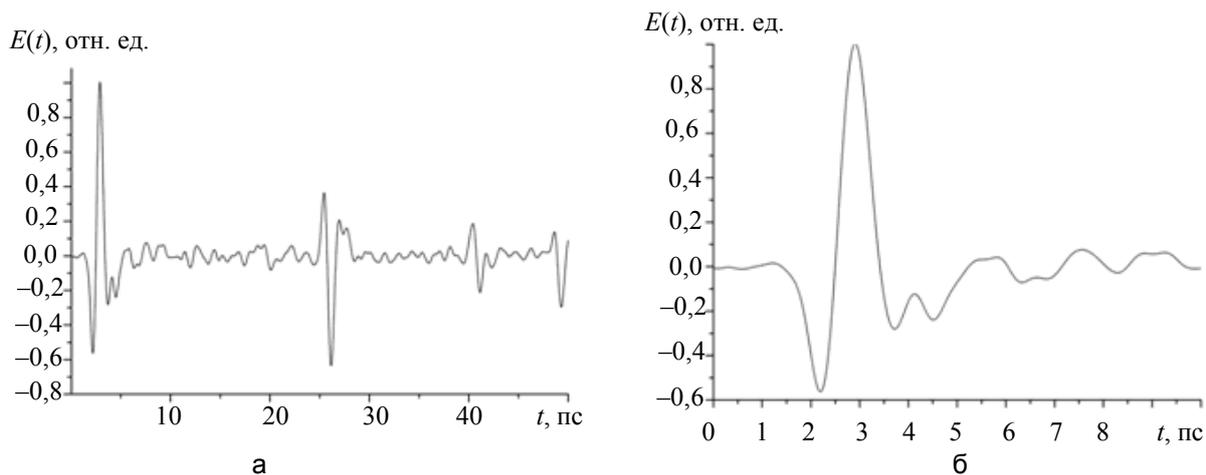


Рис. 2. Зависимость величины напряженности электрического поля ТГц импульса, отраженного от алюминиевого зеркала, от времени: 0–50 пс (а); первые 10 пс (б)

В области 24–28 пс (рис. 2, а) наблюдается однопериодная структура, по форме точно соответствующая первой, только в противофазе и с амплитудой уже отрицательного пика, равного 0,65 от первого. Данная структура, задержанная по времени на 24 пс, связана с отражением ТГц импульса от второй поверхности светоделителя ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния толщиной 1 мм (рис. 1, деталь 7).

Следующая временная структура, совпадающая по фазе с первой однопериодной структурой, 39–42 пс, соответствует двойному переотражению в кристалле CdTe толщиной 3 мм, используемом в качестве детектора ТГц поля (рис. 1, деталь 9). Последняя структура на рис. 2, а, в противофазе с первой однопериодной структурой соответствует повторному переотражению ТГц импульса от первой и второй поверхностей светоделителя ТГц излучения.

На втором этапе исследовалось отражение от слоистых структур. В качестве простых объектов был выбран CD-диск в пластиковом конверте и компьютерная дискета. Измерялось отражение ТГц импульса от пластикового конверта, от CD-диска и от всего объекта, от диска дискеты и всей дискеты (рис. 3).

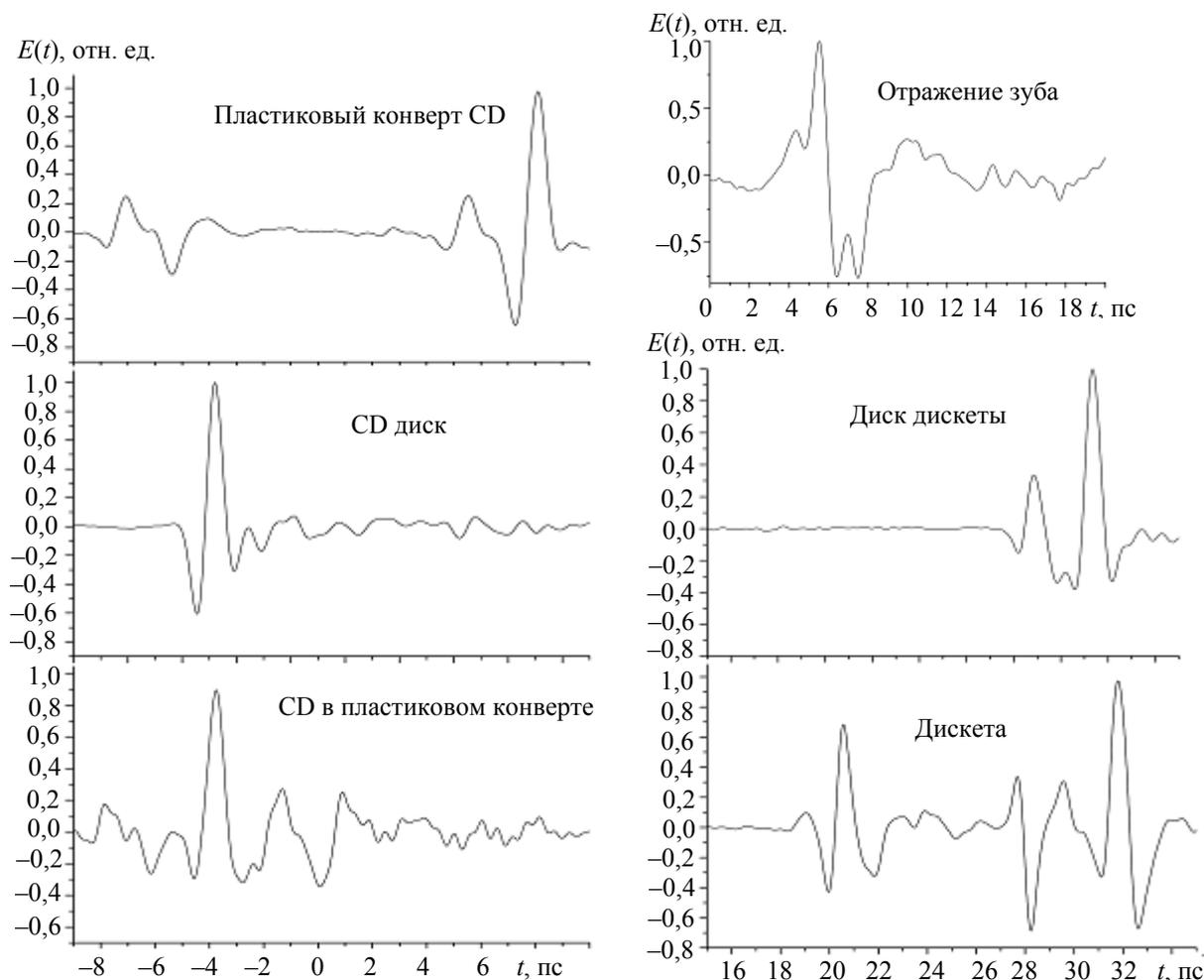


Рис. 3. Отражение ТГц импульса от различных объектов

При отражении от пластикового конверта четко видны пики отражения от первого и второго слоя конверта, причем второй пик находится в противофазе с первым. При отражении от самого CD-диска отражается структура, практически идентичная первичной (рис. 2). Этого и следовало ожидать, поскольку данная сторона CD-диска является зеркалом.

Более сложная структура отражения ТГц импульса наблюдалась в случае дискеты, поскольку в ней находился целый ряд диэлектрических поверхностей. Поскольку толщина диска дискеты составляет всего 50 мкм, то отражения ТГц импульса с длительностью порядка 1 пс (соответствующей длине пробега света в вакууме 300 мкм) от передней и задней поверхностей перенакладываются и образуют структуру из двух пиков (рис. 3). Следует отметить, что путем математического моделирования на основании результатов измерения можно вычислить толщину дискеты и показатель преломления материала.

Весьма перспективным является неинвазивное определение состояния зуба с использованием ТГц излучения. С использованием лабораторного макета были проведены эксперименты по отражению от зуба человека. На рис. 3 приведены временные зависимости ТГц импульса при отражении от зубных тканей. Из рисунка четко видно отражение от переднего слоя зубной эмали, имеющей две поверхности раздела – наружный слой и внутренний слой. Исходя из графика, можно определить оптическую толщину эмали, измеряя временной интервал между пиками временной зависимости. Согласно нижнему гра-

фику, удвоенный пробег ТГц излучения по слою зубной эмали составляет 1,1 пс, что соответствует оптической толщине 165 мкм. На заднем фронте отраженного импульса, за структурой отражения от зубной эмали, наблюдается отражение от дентина.

Таким образом, предварительные эксперименты позволили сформулировать следующие выводы:

- переотражения от светоделиителя в схеме лабораторного макета приводят к появлению паразитных сигналов и затрудняют обработку временной зависимости ТГц поля;
- поскольку ТГц импульс с длительностью порядка 1 пс соответствует длине пробега света в вакууме 300 мкм, для четкого определения границ раздела необходимо использовать более толстые образцы, а для образцов толщиной менее 300 мкм необходимо использовать методы математического моделирования;
- пространственная разрешающая способность метода определяется диаметром ТГц пучка на объекте и центральной длиной волны ТГц излучения и составляет 1 мм в наших экспериментах;
- перспективно использовать методы ТГц рефлектометрии для определения состояния зубных тканей.

Заключение

Разработан и создан лабораторный макет для проведения измерений отражения ТГц излучения от различных сред. С использованием лабораторного макета получены сигналы отражения от слоистых сред – CD-диска, дискеты, зубной ткани. Продемонстрирована возможность подробного изучения структуры слоистых сред при помощи данного метода.

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № П872.

Литература

1. Auston D.H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon // *Appl.Phys.Lett.* – 1975. – V. 26. – P. 101–103.
2. Mourou G.A., Stancampiano C., Antonetti A., Orszag A. Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser driven semiconductor switch. // *Appl. Phys. Lett.* – 1981. – V. 39. – № 4. – P. 295–365.
3. Zhang X.C., Xu J. Introduction to THz wave photonics // NY: Springer, 2009. – 246 p.
4. Lee Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. Springer Science+Business Media, LLC, XII. 2009. – 340 p.
5. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Денисюк И.Ю., Козлов С.А., Крылов В.Н., Лукомский Г.В., Петров Н.В., Путилин С.Э. Методы генерации сверхширокополосных ТГц импульсов фемтосекундными лазерами // *Оптический журнал.* – 2008. – Т. 75. – № 10. – С. 34–41.
6. Grischkowsky D., Keiding S.R., van-Exter M.P., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // *J. Opt. Society Am.* – 1990. – V. 7. – № 10. – P. 2006–2015.
7. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле // *Оптика и спектроскопия.* – 2002. – Т. 93. – № 1. – С. 158–162.

- | | |
|--|---|
| Беспалов Виктор Георгиевич | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbepaloff@gmail.com |
| Городецкий Андрей Александрович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, gorodetsky@phoi.ifmo.ru |
| Грачев Ярослав Владимирович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, grachev_y@mail.ru |
| Козлов Сергей Аркадьевич | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru |
| Новоселов Евгений Владимирович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, eugene.novoselov@gmail.com |