

Влияние вынужденного комбинационного рассеяния света на работу полупроводникового лазера в режиме затягивания частоты микрорезонатором

А. Н. Голодухина^{1,2*}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Российский квантовый центр
Россия, 121205, Москва, Сколково,
Большой бул., 30, стр. 1

(Поступила в редакцию 08.07.2025; подписана в печать 10.10.2025)

Оптические микрорезонаторы с высокой добротностью являются передовой платформой для проведения актуальных научных исследований в области квантовой оптики и многих технических приложений. Эффект затягивания частоты диода на частоту микрорезонатора — пример эффекта, который может быть реализован на платформе подобных резонаторов. Затягивание частоты позволяет сузить ширину линии излучения до единиц кГц и менее. В данной работе были изучены особенности режима затягивания частоты при наличии в системе вынужденного комбинационного рассеяния света. Обнаружено, что в присутствии стоксовской оптической гребенки ширина линии выходного излучения оказывается на порядок выше ожидаемых значений.

PACS: 42.60.Da, 42.65.Dr, 42.55.Px

УДК: 535.015

Ключевые слова: оптический микрорезонатор, вынужденное комбинационное рассеяние света, эффект затягивания частоты, ширина линии излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Интегральная платформа на основе нитрида кремния занимает лидирующие позиции в области создания передовых фотонных устройств, в частности оптических микрорезонаторов с высокой добротностью [1, 2]. Такие структуры имеют малые оптические потери при чрезвычайно малом объеме моды, что обеспечивает низкий порог проявления нелинейных эффектов. Небольшой размер устройства обеспечивает механическую стабильность. Кроме того, нитрид кремния обладает заметным коэффициентом керровской нелинейности, что позволяет возбуждать оптические керровские гребенки [3, 4]. Эти и другие уникальные свойства делают оптические микрорезонаторы передовой платформой для проведения актуальных научных исследований.

Одним из эффектов, проявляющихся благодаря высокой добротности микрорезонатора, является эффект затягивания частоты лазерного источника на частоту микрорезонатора. Эффект активно применяется для стабилизации частоты диодных лазеров [5]. При возбуждении моды микрорезонатора возникает обратное рассеяние Рэлея, обеспечивающее пассивную частотно-селективную оптическую обратную связь с лазерным диодом, что приводит к значительному подавлению фазового шума лазерного излучения и существенному сужению спектральной линии излучения. На текущий момент были экспериментально продемонстрированы значительное сужение линии излучения и стабилизация частоты для различных типов лазеров [6–10], включая квантово-каскадный [11]

и DFB лазеры [12] с выходной шириной линии порядка нескольких Гц. Кроме того, в режиме затягивания в этом же микрорезонаторе могут возбуждаться керровские оптические частотные гребенки [13–15], при этом устройства в таком случае оказываются чрезвычайно компактными [16, 17].

Еще одним эффектом, проявляющимся благодаря высокой добротности микрорезонатора, является вынужденное комбинационное рассеяние света [18]. Сущность явления комбинационного рассеяния состоит в том, что каждая спектральная линия падающего света сопровождается появлением системы линий измененной частоты, называемых сателлитами, вследствие взаимодействия с фононами. Вынужденное комбинационное рассеяние приводит к генерации стоксовской компоненты излучения, что наблюдалось в микрорезонаторах из плавленного кварца [19–22], кремния [23], карбида кремния [24], фторида кальция [25], фторида бария [26] и других. В клиновидных планарных микрорезонаторах из плавленного кварца наблюдались стоксовы солитоны, возбуждаемые под воздействием солитонов Керра, которые образуют решетку контраста показателя преломления [27]. Однако, вынужденное рамановское рассеяние света в интегральных структурах из нитрида кремния до сих пор наблюдалось только в виде сдвига спектра диссипативного керровского солитона в резонаторах с аномальной дисперсией групповых скоростей [28]. Ожидаемый стоксов сдвиг в нитриде кремния согласно [28] составляет порядка 12 ТГц.

В нашей работе экспериментально продемонстрировано вынужденное комбинационное рассеяние света внутри оптического микрорезонатора из нитрида кремния и изучены особенности его возбуждения и эволюции. В качестве источника накачки был исполь-

* golodukhina.an23@physics.msu.ru

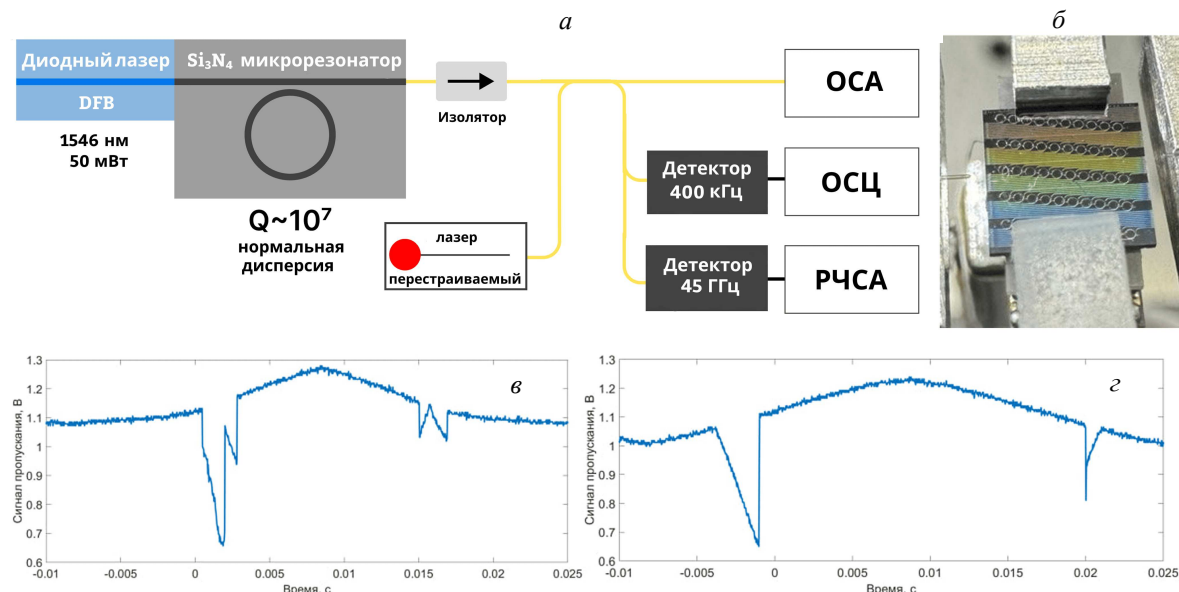


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а). Фото чипа (б). Резонансные кривые при различных значениях фазы затягивания (в) и (г)

зован полупроводниковый диод в режиме затягивания частоты. За счет регулировки входной мощности и фазы затягивания были получены керровские и стоксовские оптические частотные гребенки. При одном наборе параметров системы наблюдалась генерация только керровской или стоксовской гребенки, соответственно, при другом-сосуществование этих двух нелинейных эффектов.

Обнаружено и исследовано влияние рамановского рассеяния на ширину линии затянутого диода. При наличии стоксовской оптической частотной гребенки наблюдаемая ширина линии оказывается на порядок больше ожидаемых значений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В эксперименте используются интегральные микро-резонаторы из нитрида кремния с нормальной дисперсией групповых скоростей с различной величиной связи с возбуждающим волноводом и с собственной добротностью около 10 миллионов. Для микрорезонаторов, используя методику, описанную в работе [29], измерены необходимые параметры: добротность, дисперсия, коэффициент обратного рассеяния. В качестве источника накачки используется полупроводниковый одночастотный диод с длиной волны 1546 нм, чья температура поддерживается постоянной за счет термостабилизатора. Лазерное излучение заводится в волновод торцевым методом, непосредственным подведением лазерного диода встык к чипу. Из чипа излучение выводится с помощью линзированного оптоволокна SMF-28. Перед измерением выходной сигнал пропускается

через изолятор для исключения влияния обратной волны, отраженной от элементов приемников, на активную среду диодного лазера. Выходной сигнал анализируется при помощи осциллографа, оптического (OSA) и радиочастотного (ESA) анализаторов спектра. Ширина линии генерации измеряется методом гетеродина с референсным лазером. Выходной сигнал сбивается с излучением стабильного лазера с заданной длиной волны. Ширина линии излучения рассчитывается по сигналу биений, наблюдаемому на электрическом анализаторе спектра. Кроме того, проводятся измерения сигнала биений с разделением по квадратурам (IQ-данные) с ESA, которые позволяют точнее оценить характеристики фазового шума. Схема установки приведена на рис. 1, а, фотография чипа с микрорезонаторами — на рис. 1, б.

При перестройке тока диодного лазера меняется частота его излучения. Это позволяет подобрать ток, при котором возбуждается мода микрорезонатора. На осциллографе визуально оцениваются особенности моды: глубина, ширина, форма. За счет изменения расстояния между чипом и диодом есть возможность регулировки фазы волны обратного рассеяния, приходящей в лазер. Эту фазу еще называют фазой затягивания. Изменение фазы затягивания меняет форму резонансной кривой на осциллографе. На рис. 1, в, г представлены резонансные кривые для различных фаз затягивания. После подбора желаемой фазы затягивания режим перестройки частоты лазера отключается и путём постепенной регулировки тока диода осуществляется вход в режим затягивания частоты. Резкое уменьшение выходного сигнала указывает на попадание в соответствующий режим.

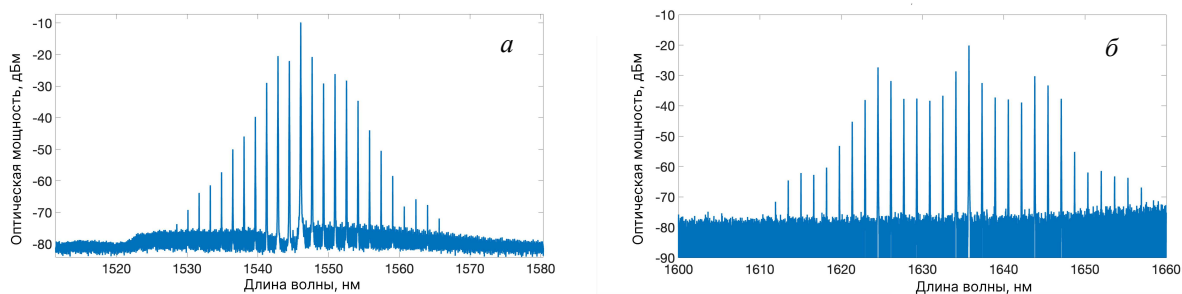


Рис. 2. Примеры керровской (а) и стоксовской (б) гребенок

2. СТОКСОВСКАЯ ГРЕБЕНКА ПРИ НАКАЧКЕ ДИОДОМ В РЕЖИМЕ ЗАТЯГИВАНИЯ

При использовании в качестве источника накачки полупроводникового лазера в режиме затягивания частоты нам удалось добиться возбуждения вынужденного стоксовского рассеяния света в микрорезонаторе из нитрида кремния с нормальной дисперсией групповых скоростей. Важно отметить, что ранее рамановское рассеяние света в нитриде кремния не наблюдалось напрямую. Оно было непосредственно получено в других материалах и нашло различное практическое применение [30–32].

Мы предполагаем, что одним из ключевых факторов для наблюдения вынужденного комбинационного рассеяния является высокая напряженность электромагнитного поля в микрорезонаторе. Она достигается за счет высокой добротности резонатора $Q \geq 10^7$ и коэффициента связи между волноводом и кольцом. Для резонатора с наименьшим коэффициентом связи наблюдалась генерация только керровской гребенки вокруг основной линии накачки (рис. 2, а). Для кольца с наибольшим нагружением-широкая и мощная стоксовская гребенка в диапазоне длин волн от 1610 до 1660 нм (рис. 2, б). Вероятно, ранее не удавалось преодолеть порог возбуждения данного нелинейного эффекта в нитриде кремния и пронаблюдать его напрямую.

Другим важным условием для формирования стоксовской оптической гребенки является фаза затягивания. Данный параметр регулируется непосредственным изменением расстояния между чипом и диодом при помощи пьезоэлемента. При фиксированной фазе осуществляется вход в режим затягивания частоты. В зависимости от значения этого параметра наблюдается характерная керровская или стоксовская оптическая гребенка или сосуществование данных нелинейных эффектов. При регулировке фазы мы уменьшаем эффективность связи между волноводом и чипом и изменяем отстройку частоты от частоты холодного резонанса. Такая отстройка определяет возможность генерации керровских частотных гребенок микрорезонаторах [33]. Изменяя фазу, мы можем либо реализовать отстройку оптимальную для генерации гребенки,

либо сделать эту отстройку такой, при которой генерация обычной керровской гребенки невозможна, что приводит к накоплению достаточной плотности мощности для возбуждения вынужденного рамановского рассеяния, имеющего более высокий порог генерации. То есть, за счет изменения только фазы затягивания удается добиться перехода между двумя нелинейными процессами.

Таким образом, мы делаем вывод, что не только достаточная интенсивность поля, но и выбор подходящей фазы является ключевым параметром для генерации вынужденного комбинационного рассеяния света в микрорезонаторе из нитрида кремния. При определенной отстройке большая часть входной мощности уходит на генерацию керровской гребенки, и становится невозможно преодолеть порог возбуждения рамановского рассеяния. При другом значении фазы, наоборот, не выполнены условия для проявления обычной гребенки, и вся мощность идет на формирование стоксовской гребенки (рис. 3). Оптические спектры на рис. 3, б, г соответствуют областям на спектрах пропускания рис. 3, а, в, отмеченным красными маркерами.

3. ВЛИЯНИЕ РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАТЯГИВАНИЯ

В ходе проведения исследования измерялись спектральные характеристики накачки в режиме SIL. Было обнаружено, что возбуждение в резонаторе вынужденного комбинационного рассеяния света сопровождается значительным увеличением ширины линии излучения (рис. 4). При наличии стоксовской оптической гребенки наблюдаемая ширина центральной линии составляет десятки кГц против ожидаемых единиц кГц или сотен Гц. Анализ фазовых шумов также указывает на ослабление эффективности затягивания.

На основе полученных данных сделано предположение о значительном влиянии вынужденного комбинационного рассеяния света на эффективность затягивания частоты диодного лазера на частоту микрорезонатора. Во-первых, между компонентами накачки и компонентами стоксовской гребенки возникает фазовая кросс-модуляция. Во-вторых, обратная волна от

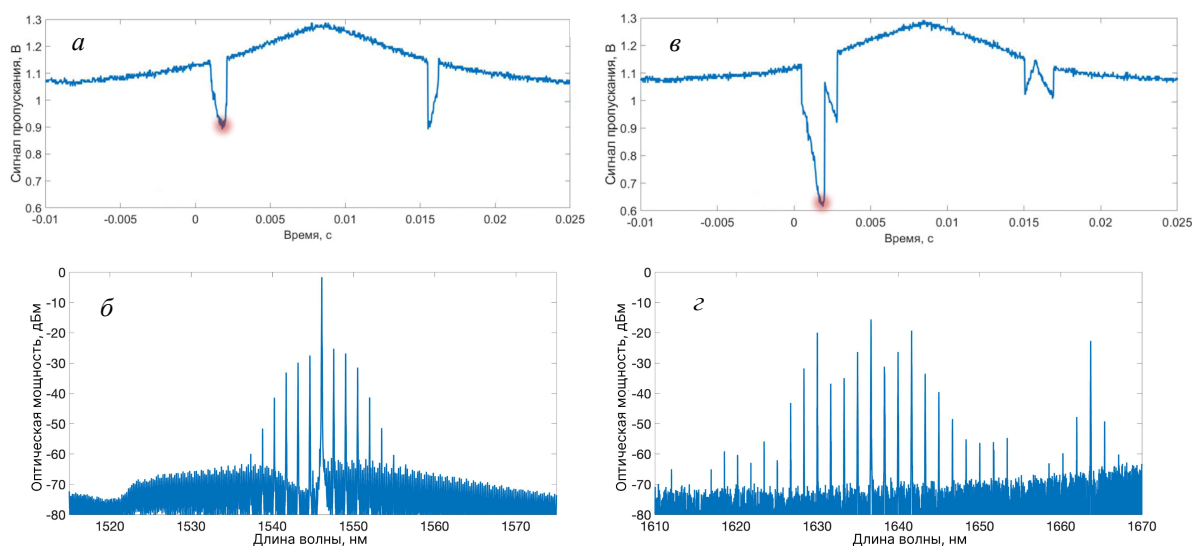


Рис. 3. Форма пропускания сигнала на осциллографе при генерации керровской (а) и стоксовской (в) гребенок. Генерация керровской (б) и стоксовской гребенок (г) при различных фазах затягивания

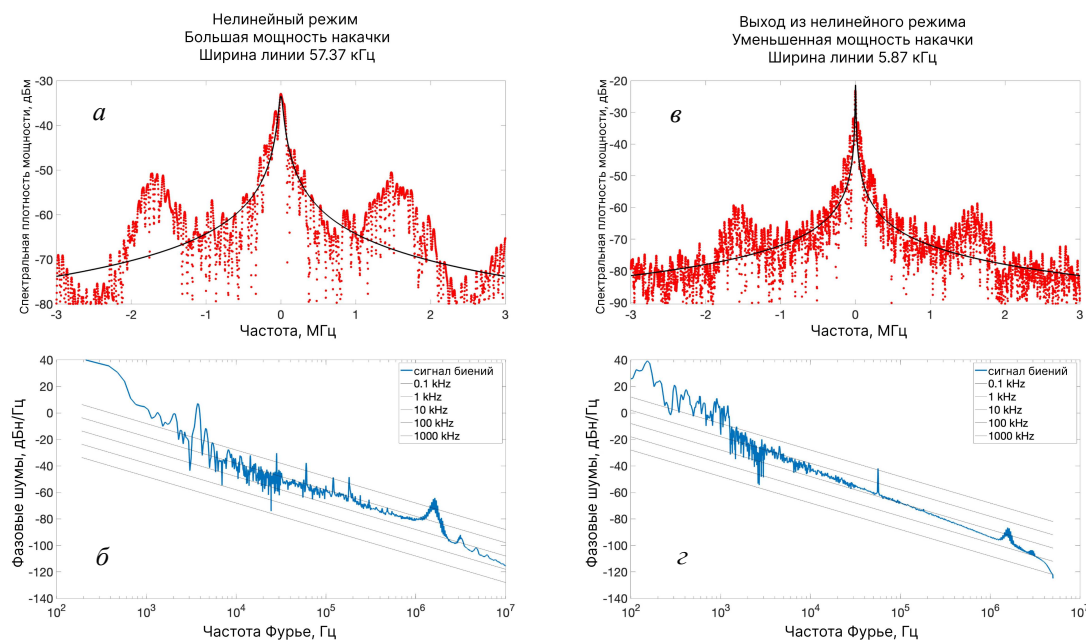


Рис. 4. Спектральные характеристики накачки в режиме затягивания в случае рамановской генерации (левый столбец) и в линейном режиме (правый столбец). Ширина линии лазера сужается в 10 раз

линий рамановского рассеяния может оказывать влияние на активную среду лазера. Кольцевые микрорезонаторы в данном эксперименте обладают большим коэффициентом связи между прямой и обратной волнами. Это обеспечивает значительную мощность обратной волны.

Для подтверждения гипотезы измерялись фазовые шумы затянутого лазера при уменьшении мощности

накачки. Было выявлено увеличение фазового шума лазера при возбуждении Стоксовой компоненты. Кроме того, была выявлена устойчивая тенденция уменьшения фазовых шумов при уменьшении мощности, при этом минимальные фазовые шумы были получены при токе питания диодного лазера вблизи порога генерации. На всех рассматриваемых структурах наблюдался эффект снижения уровня фазового шума с уменьше-

нием мощности лазерного излучения. При снижении тока питания лазера изменится его частота генерации, а значит может измениться мода резонатора, на которую затягивается диодный лазер. Для сохранения длины волны накачки одновременно уменьшалась температура диода, что обеспечивало затягивание на одну и ту же моду микрорезонатора в ходе серии экспериментов. Сигналы полученных биений с референсным лазером представлены на рис. 4, *а, в* для случая возбуждения стоксовской гребенки и режима при минимальном токе. Аппроксимация сигналов биений распределением Лоренца дает ширину линии 57 кГц для случая генерации стоксовской компоненты и 5.9 кГц для случая малой мощности. На рис. 4, *б, г* представлены графики спектральной плотности мощности фазового шума сигнала биений для случаев большой и малой мощностей.

При измерении спектральной плотности мощности требуется некоторая фильтрация для уменьшения шума. Один из вариантов – разделить данные на секции, выполнить быстрое фурье-преобразование каждой секции, а затем усреднить результат и получить значение для определенной частоты, задаваемой длиной секции. Подробное описание алгоритма аппроксимации приведено в [34]. Видно существенное уменьшение фазового шума в (*г*) по сравнению с (*б*). На графики нанесены вспомогательные линии соответствующие фазо-

вому шуму осциллятора с шириной линии 0.1, 1, 10, 100, 1000 кГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе изучены особенности генерации вынужденного комбинационного рассеяния света внутри микрорезонатора из нитрида кремния при использовании в качестве источника накачки полупроводникового лазерного диода. Обнаружено, что двумя ключевыми параметрами для генерации рамановского рассеяния являются мощность и значение фазы затягивания. Выявлено существенное влияние генерации вынужденного рамановского рассеяния на эффективность затягивания частоты лазерного диода на частоту микрорезонатора. Данный нелинейный процесс приводит к значительному увеличению ширины линии затянутого диода, но может его влияние может быть ослаблено путем уменьшения мощности накачки до полного выхода из нелинейного режима.

Благодарность выражается научному руководителю И. А. Биленко и старшему научному сотруднику российского квантового центра А. Е. Шитикову

- [1] *Strekalov D., Marquardt C., Matsko A.* et al. // Journal of Optics **18** (2016).
- [2] *Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S.* Optical whispering-gallery microresonators, in Laser Applications, Vol. 2097, edited by A. A. Mak, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 1994) pp. 283 – 288.
- [3] *Del'Haye P., Schliesser A., Arcizet O.* et al. // Nature **450**, 1214 (2007).
- [4] *Xuan Y., Liu Y., Varghese L.T.* et al. // Optica **3**, 1171 (2016).
- [5] *Kondratiev N., Lobanov V., Cherenkov A.* et al. // Optics Express **25**, 28167 (2017).
- [6] *Vassiliev V., Velichansky V., Ilchenko V.* et al. // Optics Communications **158**, 305 (1998).
- [7] *Liang W., Ilchenko V.S., Eliyahu D.* et al. // Appl. Opt. **54**, 3353 (2015).
- [8] *Vassiliev V.V., Il'ina S.M., Velichansky V.L.* // Applied Physics B **76**, 521 (2003).
- [9] *Shitikov A.E., Galiev R.R., Min'kov K.N.* et al. // Scientific Reports **13**, 9830 (2023).
- [10] *Shitikov A.E., Lykov I.I., Benderov O.V.* et al. // Opt. Express **31**, 313 (2023).
- [11] *Borri S., de Cumis M.S., Insero G.* et al. // Whispering gallery mode stabilization of quantum cascade lasers for infrared sensing and spectroscopy, in Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIX, Vol. 10090, edited by A.V. Kudryashov, A.H. Paxton, and V.S. Ilchenko, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2017) p. 1009008.
- [12] *Liang W., Ilchenko V.S., Savchenkov A.A.* et al. // Opt. Lett. **35**, 2822 (2010).
- [13] *Pavlov N., Lihachev G., Koptyaev S.* et al. // Optics Letters **42**, 514 (2017).
- [14] *Voloshin A.S., Kondratiev N.M., Lihachev G.V.* et al. // Nature Communications **12**, 235 (2021).
- [15] *Shen B., Chang L., Liu J.* et al. // Nature **582**, 365 (2020).
- [16] *Raja A.S., Voloshin A.S., Guo H.* et al. // Nature Communications **10**, 680 (2019).
- [17] *Dmitriev N.Y., Koptyaev S.N., Voloshin A.S.* et al. // Phys. Rev. Appl. **18**, 034068 (2022).
- [18] *Prince R.C., Frontiera R.R., Potma E.O.* et al. // Chemical Reviews **117**, 5070 (2017).
- [19] *Spillane S., Kippenberg T., Vahala K.* // Nature **415**, 621 (2002).
- [20] *Andrianov A., Anashkina E.* // Results in Physics **17**, 103084 (2020).
- [21] *Farnesi D., Cosi F., Trono C.* et al. // Optics letters **39**, 5993 (2014).
- [22] *Kato T., Hori A., Suzuki R.* et al. // Optics Express **25**, 857 (2017).
- [23] *Griffith A.G., Yu M., Okawachi Y., Cardenas J.* // Optics express **24**, 13044 (2016).
- [24] *Li J., Wang R., Afridi A.A.* et al. // ACS photonics **11**, 795 (2024).
- [25] *Liang W., Matsko A., Savchenkov A.* et al. // Generation of kerr combs in mgi 2 and caf 2 microresonators, in 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings (IEEE, 2011) pp. 1–6.
- [26] *Lin G., Diallo S., Dudley J.M., Chembo Y.K.* // Optics

- Express **24**, 14880 (2016).
- [27] Yang Q.-F., Yi X. Yang K.Y., Vahala K. // Nature Physics **13**, 53 (2017).
- [28] Karpov M., Guo H., Kordts A. et al. // Phys. Rev. Lett. **116**, 103902 (2016).
- [29] Dmitriev N.Y., Voloshin A., Kondratiev N. et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics **135**, 9 (2022).
- [30] Andrianov A., Anashkina E. // Results in Physics **17**, 103084 (2020).
- [31] Griffith A., Okawachi Y., Cardenas J. et al. // Raman-assisted coherent, mid-infrared frequency combs in silicon microresonators. (2016).
- [32] Li J., Wang R., Afridi A. et al. // ACS Photonics **11** (2024).
- [33] Herr T., Brasch V., Jost J.D. et al. // Nat. Photon. **8**, 145 (2014).
- [34] Riley W.J., Howe D.A. Handbook of frequency stability analysis, Vol. 1065 (US Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology, 2008).

Influence of stimulated raman scattering on SIL efficiency

A. N. Golodukhina¹²

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Russian Quantum Center, Skolkovo. Moscow 121205, Russia
E-mail: golodukhina.an23@physics.msu.ru*

Optical microresonators with high quality-factor are an advanced platform for carrying out actual scientific research in the field of quantum optics and photonics. Self-injection locking (SIL) effect is an example of phenomena realized on the platform of such resonators. SIL effect allows for narrowing the width of the emission line to the order of units of kHz. In this work, we studied features of self-injection locking regime in the presence of stimulated Raman scattering in the system. It was found that in the presence of Stokes optical microcomb the output emission linewidth turns out to be an order of magnitude higher than expected values.

PACS: 42.60.Da, 42.65.Dr, 42.55.Px

Keywords: optical microresonator, stimulated raman scattering, self-injection locking effect, emission linewidth.

Received 8 July 2025

Сведения об авторе

Голодухина Алина Николаевна — студент; e-mail: golodukhina.an23@physics.msu.ru.