

Термины.

RWG - Resonant Waveguide Gratings - резонансные волноводные решетки =
GMR gratings - guided mode resonant gratings = waveguide-mode resonant gratings
resonant subwavelength gratings (SWG) = субволновые решетки,



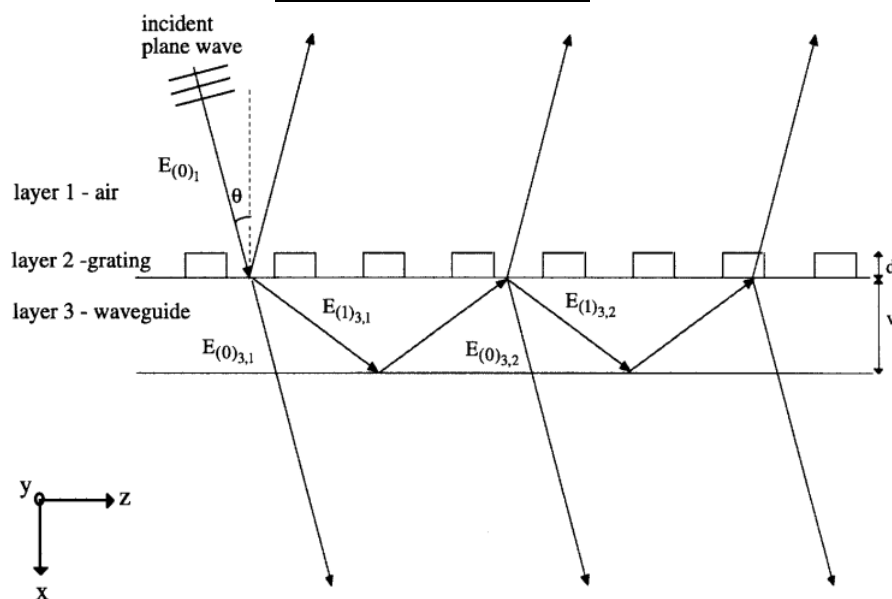
resonance grating couplers, or waveguide-mode resonances (WMRs)

leaky guided modes - моды с сильной утечкой = quasi-guided modes

Розенблат.

David Rosenblatt, Avner Sharon, and Asher A. Friesem. Resonant Grating Waveguide Structures // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997. V.33.

No.11. P.2038-2059.



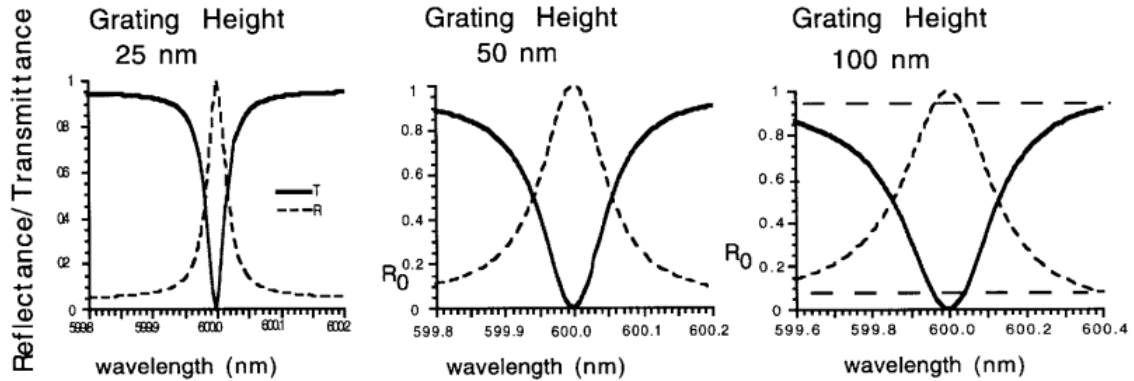
Перейдем в систему отсчета, которая движется направо с такой скоростью, что в этой системе отсчета свет в волноводной зоне движется строго вертикально. В этой системе отсчета на толщине слоя должно укладываться целое число полуволин, если не учитывать фазовый сдвиг при отражении от границ волноводного слоя при полном внутреннем отражении в исходной системе отсчета.

Резонанс соответствует длине волны света, при которой дифракционный порядок идет под таким углом α к вертикали, что $h = m \frac{\lambda_x}{2}$ (без учета фазовых сдвигов при отражении света) для толщины волноводного слоя h и вертикальной циклической пространственной частоты λ_x в волноводном слое.

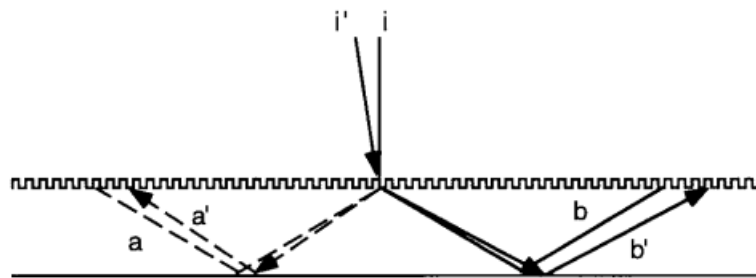
$$h = m \frac{\lambda_x}{2} \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda_x} = k_x = nk_{0x} = m \frac{\pi}{h} \Rightarrow 2hnk_0 \cos(\alpha) = 2\pi m \Rightarrow$$

$$2hn_2k_0 \cos(\alpha) + \delta\varphi_{23} + \delta\varphi_{34} = 2\pi m$$

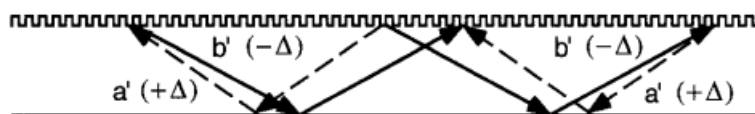
Если зубья решетки маленькие, то малы потери волноводного слоя; большая добротность волноводного слоя, как резонатора; узкий резонанс.



Если падающий свет наклонить на малый угол, то наклоняться дифракционные порядки, и резонансное условие $h = m \frac{\lambda_x}{2}$ с поправками на фазовый сдвиг при отражениях будет выполняться для двух разных длин волн.



Два пути для попадания в одну точку решетки, и формирование Фано резонанса. Couplers, or waveguide-mode resonances (WMRs)



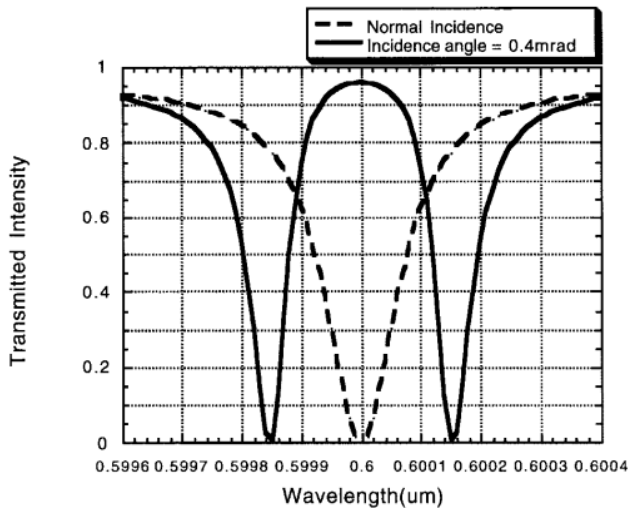


Fig. 13. Transmitted intensity as a function of wavelength for the grating structure in Fig. 5 with the grating of Duty Cycle = 0.5: (a) coupled wave model using thin grating approximation and (b) numerical model.

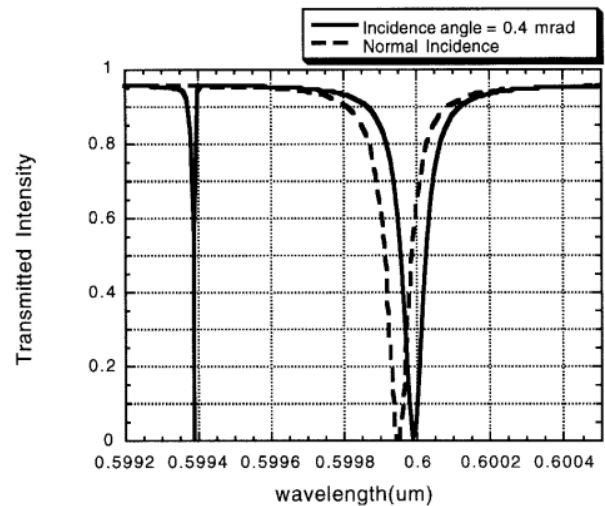
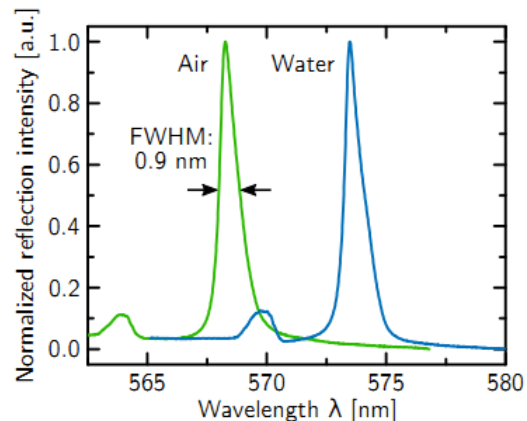
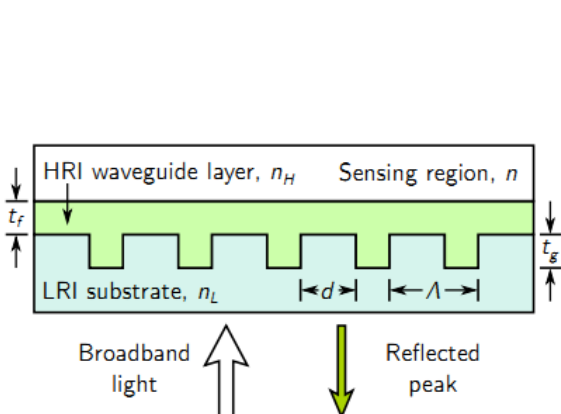


Fig. 14. Transmitted intensity as a function of wavelength for the grating structure in Fig. 5 with the grating of Duty Cycle = 0.25: (a) coupled wave model using thin grating approximation and (b) numerical model.

Petur G. Hermannsson, Kristian T. Sorensen, Christoph Vannahme, Cameron L.C. Smith, Jan J. Klein, Maria-Melanie Russev, Gabi Grutzner, and Anders Kristensen. "All-polymer photonic crystal slab sensor" // Optics Express. 2015. Vol. 23, No. 13. P.16529-16539.



Дешевый в изготовлении полностью полимерный образец имеет удобные в использовании плоские границы. Образец представляет собой решетку с волноводным слоем (guided-mode resonance GMR) и имеет спектрально узкий (до 1 нм) резонанс в отраженном свете, освещается снизу, а сверху образца помещается исследуемая среда, от показателя преломления которой зависит частотный сдвиг резонанса. Образец — сенсор для среды над образцом.

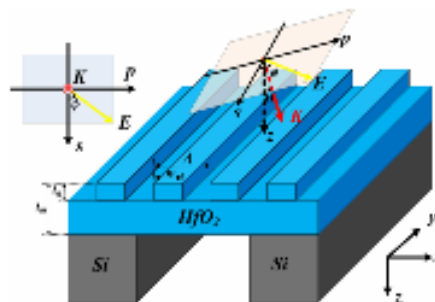
Low refractive index polymer (LRI). High refractive index polymer (HRI) (волноводный слой). Резонанс наблюдался для TE поляризации, при которой вектор E направлен вдоль штрихов решетки.

В полимере с высоким показателем преломления образуется волноводный слой. Guided-mode resonance (GMR) — волноводный резонанс стелющейся моды (leaky mode) дифракционной решетки в тонком волноводном слое с высоким показателем преломления, шаг которой не позволяет появиться в воздухе даже первому дифракционному порядку (subwavelength waveguide grating SWG). В волноводном слое образуется (+1) и (-1) порядок дифракции.

Резонансная частота волноводного слоя образца зависит от сдвига фазы при полном внутреннем отражении на границе полимерного слоя с высоким показателем преломления (зеленый слой) и исследуемой среды (белый слой). На рисунке экспериментальные кривые для случая, когда над образцом воздух и когда над образцом вода.

photonic crystal slabs (PCS)
low cost all-polymer PCS sensor

Xumin Gao, Tong Wu, Yin Xu, Xin Li, Dan Bai, Gangyi Zhu, Hongbo Zhu, and Yongjin Wang. "Angular-dependent polarization-insensitive filter fashioned with zero-contrast grating". Optics Express. 2015. Vol. 23, No. 12. P. 15235-15241.



При изменении угла падения света резонанс в отражении света для каждой поляризации раздваивается. Изменяя угол падения света можно добиться одновременного резонанса для двух поляризаций.

Образец представляет собой тонкий слой окиси гафния HfO₂ со штрихами из той же окиси гафния. Нет разницы показателей преломления между штрихами и подложкой (zero-contrast grating ZCG). Образец окружен воздухом (free-standing).

В тонком горизонтальном волноводном слое окиси гафния бегущая волна направлена не совсем горизонтально и испытывает полное внутреннее отражение от верхней и нижней границы слоя. Такую волну можно рассматривать, как пару волн с противоположным значением вертикальной составляющей волнового вектора. Суммарная волна бежит горизонтально вдоль слоя, а в вертикальном направлении образуется стоячая волна. Если при этом вектор электрического поля расположен в плоскости падения на границу слоя (перпендикулярно штрихам решетки, p поляризация), то при полном внутреннем отражении происходит один фазовый сдвиг. Для ортогональной поляризации (s поляризации) — другая величина фазового сдвига. Каждая составляющая суммарной горизонтальной волны идет под своим углом к горизонтальной плоскости в зависимости от поляризации, чтобы после отражения от верхней и нижней грани оказаться в фазе с самой собой. Горизонтальная составляющая волнового вектора и горизонтальная составляющая фазовой скорости оказывается разная для двух поляризаций.

Волна в волноводе оказывается в резонансе с падающей на образец волной, если разность фаз у двух штрихов для волны в волноводе и для падающей волны одинаковая. Другими словами падающая волна входит в слой

окси гафния через штрихи и, отразившись от двух границ волноводного слоя, может оказаться в фазе с волной, которая только входит в слой окиси гафния. Это спектрально узкий резонанс. Вне резонанса свет в волноводе не накапливается, а проходит образец насквозь.

При нормальном падении света на образец резонанс образуется для p поляризации (вектор E перпендикулярен штрихам) при длине световой волны $\lambda \approx 640\text{ нм}$ и $\lambda \approx 460\text{ нм}$ (разные моды в волноводе), а для s поляризации — при $\lambda \approx 560\text{ нм}$ (на рисунке ниже). В резонансе коэффициент отражения света образцом резко возрастает практически до 100%. Полуширина резонанса примерно 10 нм. При отклонении угла падения света на образец от нулевого значения каждый резонанс раздваивается по частоте (по длине волны) для (+1) и (-1) порядка дифракции в волноводном слое окиси гафния.

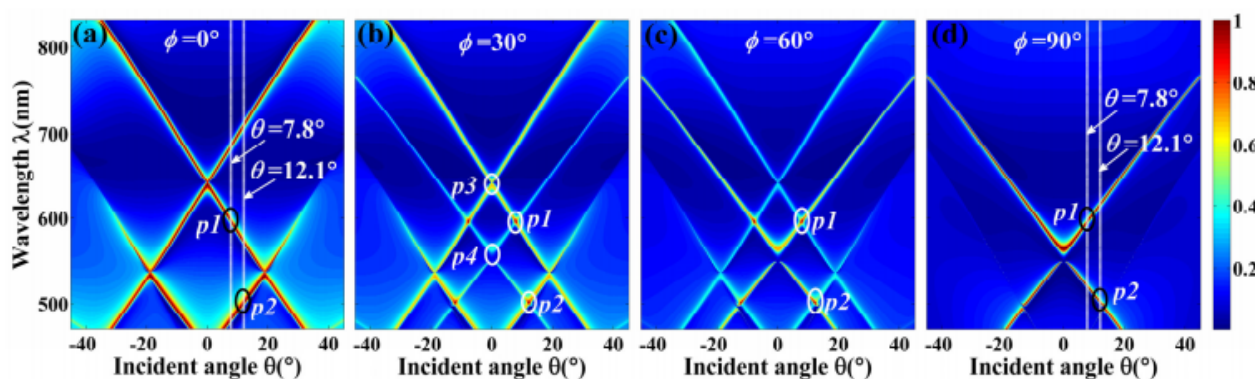


Fig. 3. Simulation results of angular-resolved reflectance for the linear HfO_2 ZCG filter with $\Lambda = 400\text{ нм}$, $\eta = 0.5$, and $t_g = 70\text{ нм}$ under different polarization angles: (a) $\phi = 0^\circ$ (s -polarization); (b) $\phi = 30^\circ$; (c) $\phi = 60^\circ$; (d) $\phi = 90^\circ$ (p -polarization).

При изменении угла падения света (+1) порядок для одной поляризации идет навстречу по частоте резонанса (-1) порядку для другой поляризации. Авторы работы подобрали угол падения света, при котором резонанс 100% отражения света происходит одновременно для обеих поляризаций (неселективный по поляризации фильтр отраженного света). При нормальном падении света на образец отраженный свет для каждой поляризации отличается даже по цвету.

Guided-mode resonance (GMR) — резонанс стелющейся моды (leaky mode) дифракционной решетки в тонком волноводном слое с высоким показателем преломления, шаг которой не позволяет появиться в воздухе даже первому дифракционному порядку (subwavelength waveguide grating SWG).

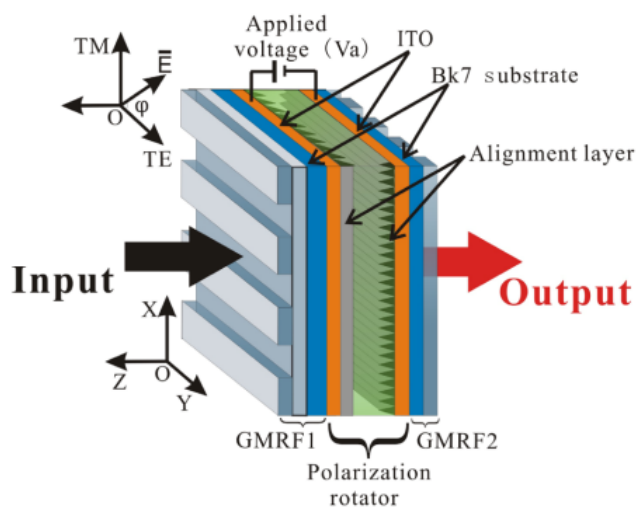
High-contrast gratings (HCGs) — решетки со штрихами окруженными средой с низким показателем преломления для достижения высокого отражения от штрихов.

27. D. Gerace and L. C. Andreani, "Gap maps and intrinsic diffraction losses in one-dimensional photonic crystal slabs," Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft Matter Phys. 69(5 Pt 2), 056603 (2004).

Linyong Qian, Dawei Zhang, Bo Dai, Qi Wang, Yuanshen Huang and Songlin Zhuang. "Optical notch filter with tunable bandwidth based on guided-mode resonant polarization-sensitive spectral feature". Optics Express. 2015. Vol. 23, No. 14. P.18300-18309.

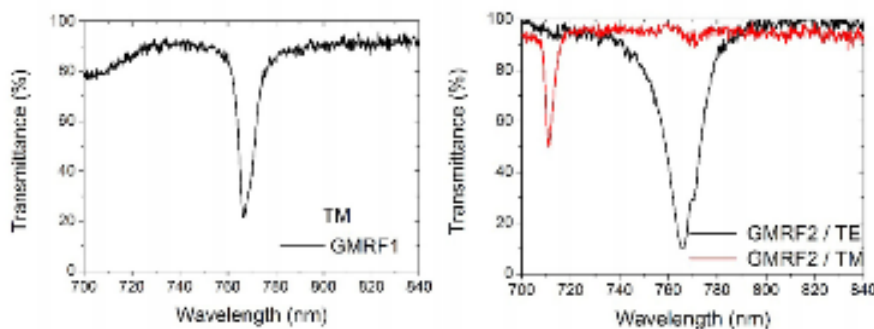
Образец содержит две параллельные друг другу и последовательные для луча волноводные GMR решетки (guided mode resonant gratings) с одинаковой центральной частотой и разной спектральной шириной резонанса 100%-го

отражения. В объеме между двумя решетками поляризацию света можно поворачивать, изменяя при этом часть света, которую отражает назад вторая волноводная решетка со спектрально более широким резонансом отражения. Этим поворотом изменяется ширина провала в спектре пропускания всего образца.



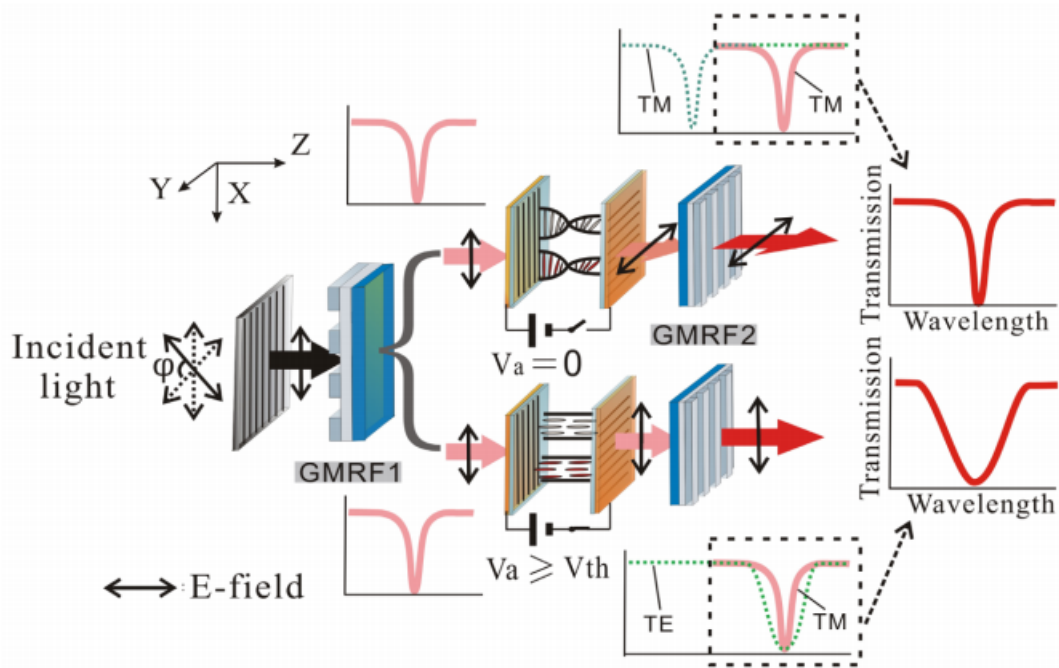
Поворот поляризации осуществляется электрическим напряжением с помощью жидких кристаллов twisted nematic liquid crystal (TN-LC) cell. На схеме — polarization rotator.

Для каждой решетки резонанс в ТМ поляризации (вектор E перпендикулярен штрихам решетки) в два с небольшим раза спектрально уже, чем резонанс в ТЕ поляризации. Резонанс ТМ поляризации каждой решетки имеет большую частоту, чем резонанс ТЕ поляризации.



Первую решетку GMRF1 свет проходит в ТМ поляризации с узким резонансным провалом в пропускании. Параметры второй решетки GMRF2 подобраны так, чтобы центральная частота ТЕ резонанса второй решетки совпадала с центральной частотой ТМ резонанса первой решетки. Жидкие кристаллы между решетками управляемо поворачивают поляризацию. Если поляризацию повернуть так, что для второй решетки свет будет иметь ТМ поляризацию, как и для первой решетки, то вторая решетка не будет отражать свет, и резонанс останется узким (на рисунке слева), каким его сделала первая решетка. Если поляризацию повернуть так, что для второй решетки свет будет иметь ТЕ поляризацию, то вторая решетка резонансно отразит свет в более широком интервале частот (с той же центральной частотой), то есть резонансное уменьшение пропускания образца станет более широким. Угол

поворота поляризации и ширину резонанса можно изменять плавно (непрерывно).



Sakoolkan Boonruang, Andrew Greenwell, and M. G. Moharam. Multiline two-dimensional guided-mode resonant filters // Applied Optics. 2006. V.45. No.22. P.5740-5747.

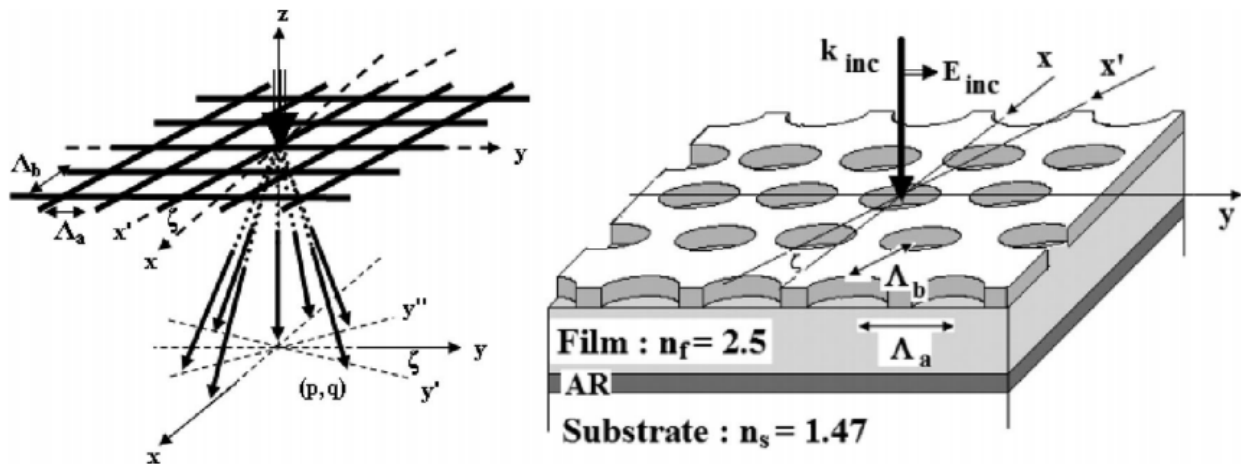


Fig. 3. General two-dimensional crossed diffraction grating and a 2D-GMR structure.

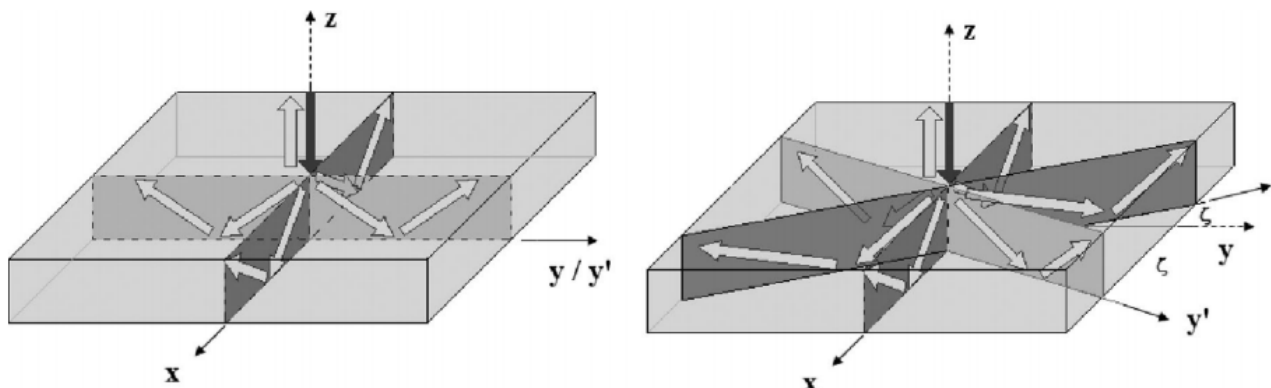


Fig. 4. Planes of diffraction in a 2D-GMR with rectangular- and hexagonal-grid structures.

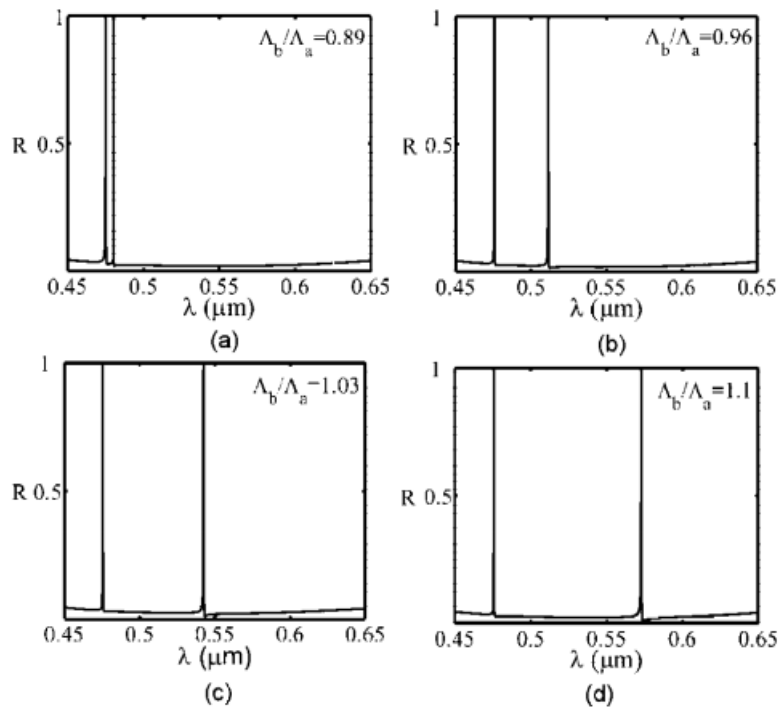


Fig. 7. Spectral response of the two-line 2D-GMR filters with a rectangular-grid structure. (a) $\Lambda_b/\Lambda_a = 0.89$; (b) $\Lambda_b/\Lambda_a = 0.96$; (c) $\Lambda_b/\Lambda_a = 1.03$; (d) $\Lambda_b/\Lambda_a = 1.1$ for a normal incident TE wave (polarized along the y axis) from air. The structure parameters are grating ($n_H/n_L = 1.5/1$, airhole radius = 50 nm, $\Lambda_a = 281$ nm, $t_g = 100$ nm), film ($n_f = 2.5$, $t_f = 50$ nm), AR layer ($n_{AR} = \sqrt{n_f n_s}$, $t_{AR} = 475/4n_{AR}$), and substrate ($n_s = 1.47$).

Wen-Kai Kuo and Che-Jung Hsu. "Two-dimensional grating guided-mode resonance tunable filter". Optics Express. 2017. Vol. 25, No. 24. P.29642-29649.

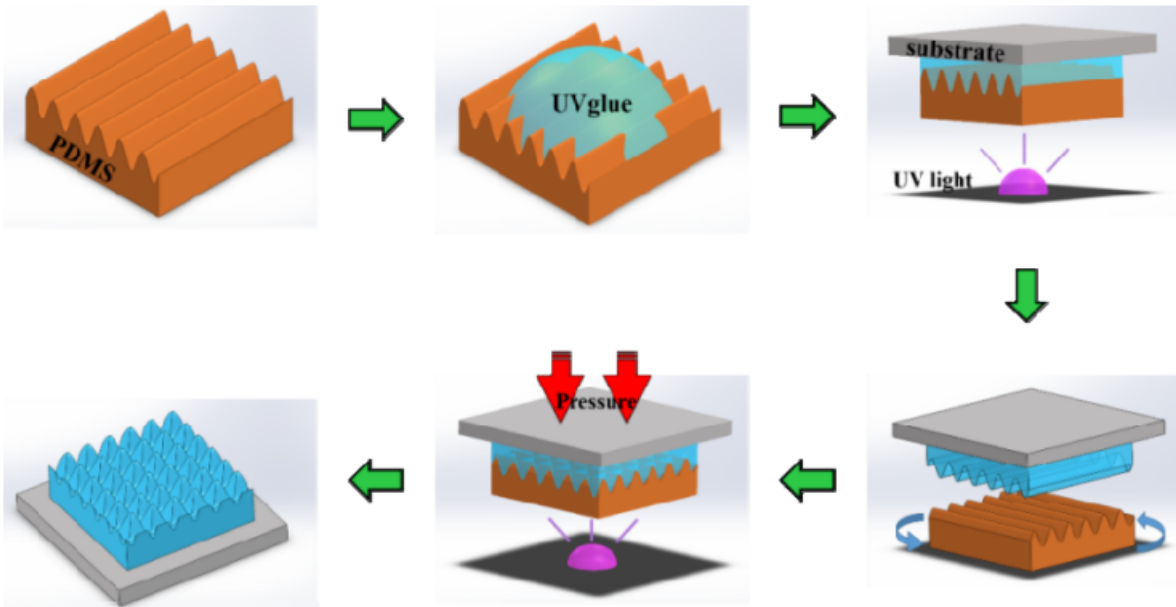
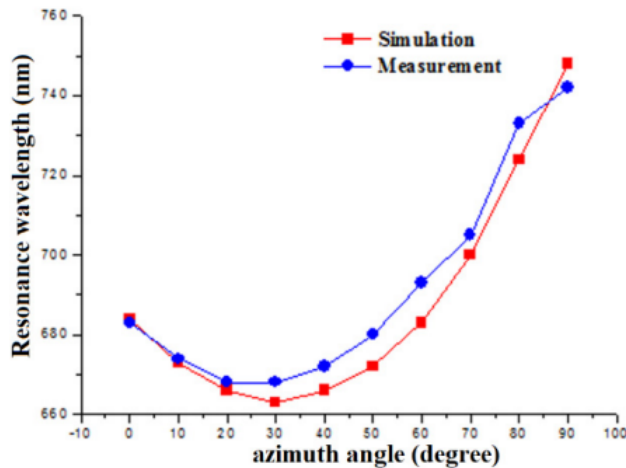
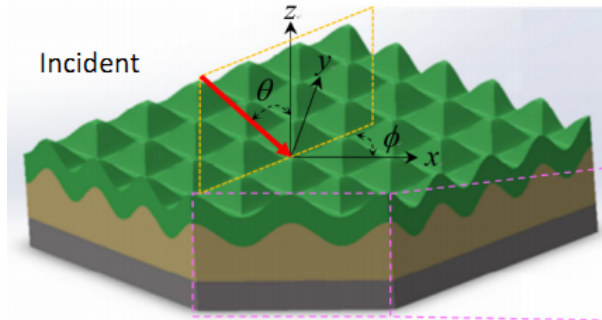


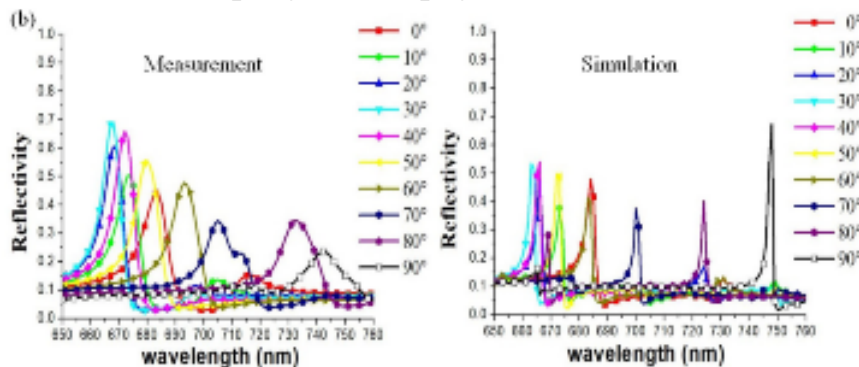
Fig. 1. Two-step nanoimprinting process.



Образец представляет собой двумерную решетку с волноводным слоем (guided-mode resonance GMR). Угол падения света фиксируют (32°). Решетку поворачивают вокруг нормали к решетке. При этом в плоскости падения света изменяется эффективный период решетки. Соответственно изменяется резонансная длина волны отраженного образцом света.

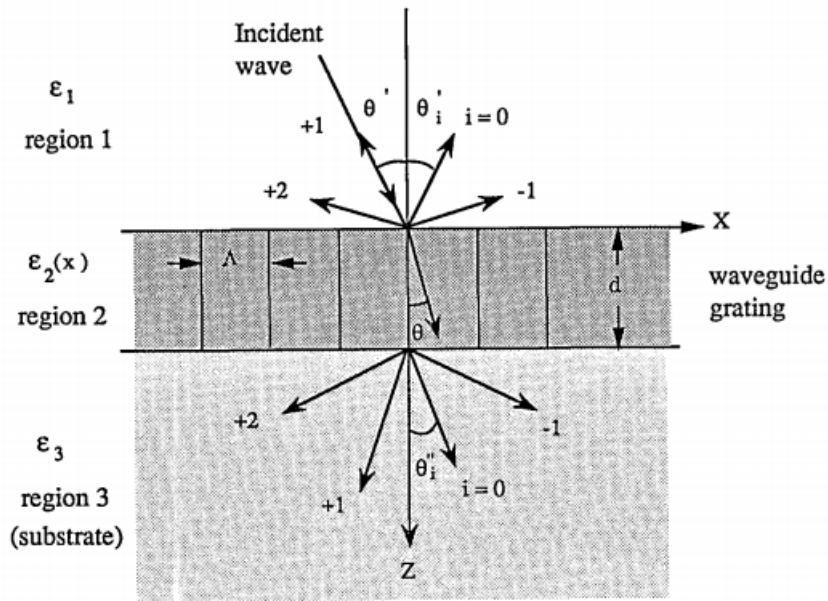


Двумерную решетку изготавливают с помощью одномерного шаблона решетки. Шаблон надавливают на клейкую массу (клей), отрывают от клейкой массы, поворачивают вокруг нормали к шаблону на некоторый угол (30° , 60° , 90° в трех вариантах изготовления) и снова надавливают шаблоном на клейкую массу. Клей полимеризуют ультрафиолетом. Сверху на двумерную решетку накладывают тонкую пленку ZnO (толщина 250 нм, показатель преломления $n = 2$) волноводного слоя. На рисунке сверху вниз: ZnO, клей, стекло.



Коэффициенты отражения не достигают единицы из-за наличия дифракционных порядков в отраженном свете.

S. S. Wang and R. Magnusson. Theory and applications of guided-mode resonance filters // 1993. Applied Optics. V.32. No.14. P.2606-2613.



Решетка Брэгга.

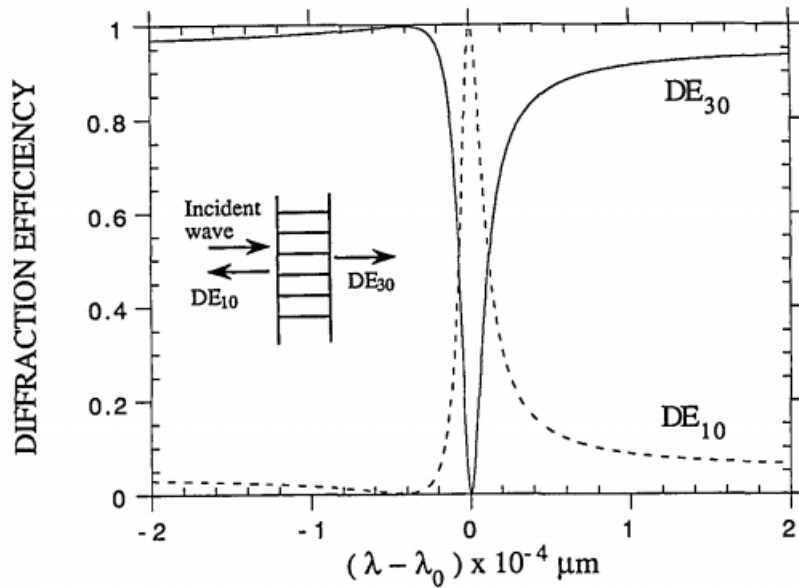


Fig. 5. TE spectral response of an asymmetric guided-mode resonance filter. The parameters are $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_3 = 2.161$, $\epsilon_g = 3$, $\theta' = 0^\circ$ (normal incidence), $\Lambda = d = 0.33 \mu\text{m}$, $\Delta\epsilon/\epsilon_g = 0.05$, center free-space wavelength $\lambda_0 = 547 \text{ nm}$, and linewidth of $\sim 0.02 \text{ nm}$.

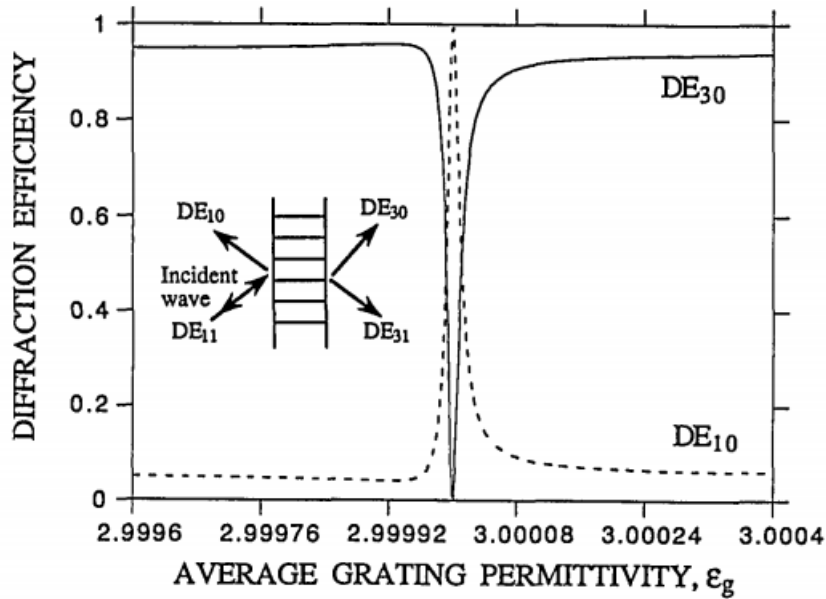


Fig. 8. Resonance line in terms of the average relative permittivity of the waveguide grating for TE polarization. The Bragg condition $\lambda/\Lambda = 2 \sin \theta'$ is satisfied. The parameters for this example are $\Delta\epsilon/\epsilon_g = 0.005$, $d = 0.32 \mu\text{m}$, $\epsilon_1 = 1$, $\epsilon_3 = 2.161$, $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, and $\theta' = 31^\circ$; DE_{10} , DE_{11} , DE_{30} , and DE_{31} are diffraction efficiencies.

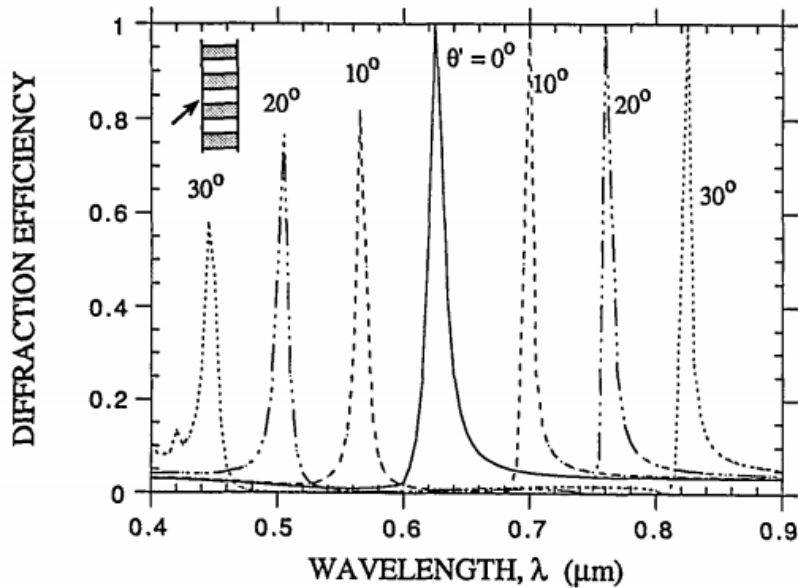
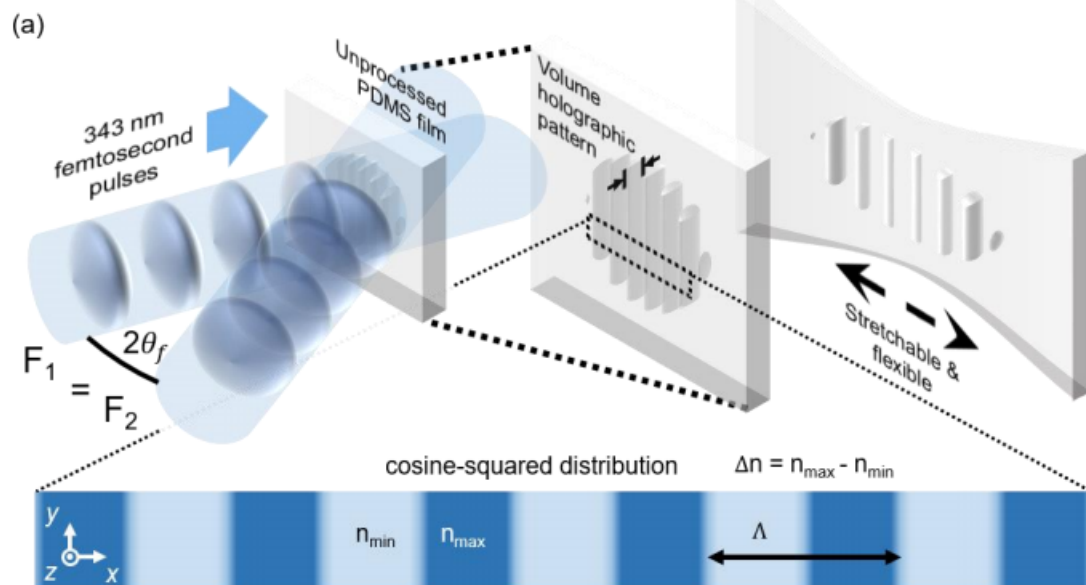


Fig. 9. TE filter reflectivity for a waveguide grating with square-wave grating shape. The angle θ' is the external (air) angle of incidence. The parameters are $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 2.25$, $\epsilon_g = 3.125$, $\Lambda = 0.4 \mu\text{m}$, and $d = 0.15 \mu\text{m}$.

Nicolas Cheng Yang Tham, Pankaj K. Sahoo, Young-Jin Kim, and Vadakke Matham Murukeshan. Ultrafast volume holography for stretchable photonic structures // Optics Express. 2019. V.27. No.9. P.12196-12212.



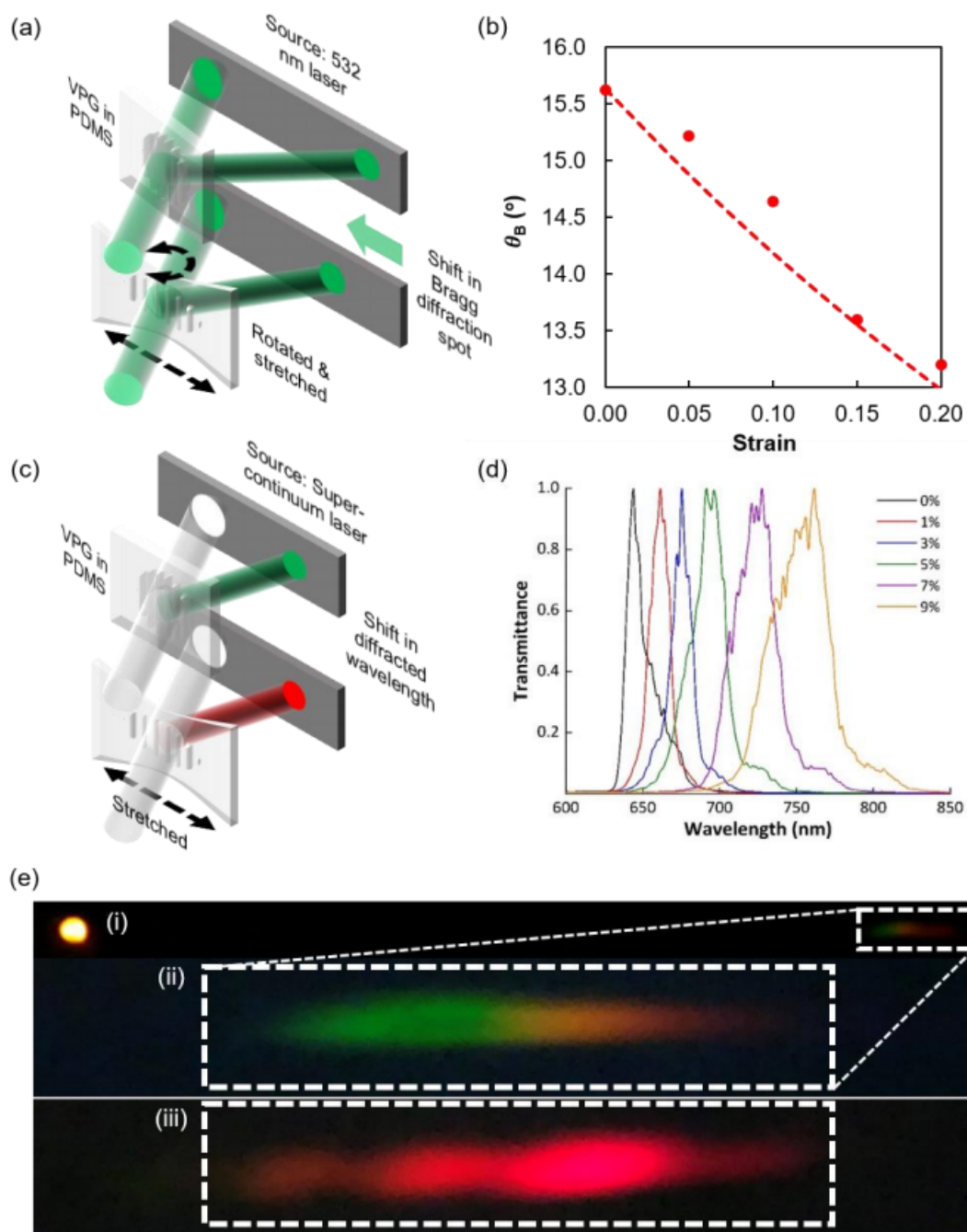


Fig. 4. Tunable beam steering and spectroscopy demonstrated with stretchable and flexible VPGs in PDMS. (a) Schematic of VPG as a free space beam steering device via rotation and stretching for a single wavelength (532 nm). (b) Change in Bragg angle in relation to strain (%). Dotted line indicates the expected Bragg angle, while the plotted points indicate the measured angles. (c) Schematic of VPG as free space transmission-based spectroscopic grating with a white light source. (d) Change in peak wavelength and spectral dispersion in relation to strain (%). (e) Demonstration of the tunable spectroscopic transmission grating using a supercontinuum (SC) laser. (i) 0th order and 1st Bragg order diffracted beam. (ii) & (iii) Close-up of diffracted spot before and after stretching, marked in white. [Visualization 1](#) shows the spectrum change as the sample is stretched and rotated.

Решетку растягивают и поворачивают для сохранения условия Брэгга для первого порядка дифракции. Углы дифракции примерно λ / D .