

ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ ДЛЯ ПАССИВНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Левченко К.М., Королёнок В.И., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Савилова Ю.И. – канд. техн. наук, доцент

Рассмотрены физические принципы пассивного радиационного охлаждения, основанного на использовании фотонных кристаллов. Описан механизм формирования фотонной запрещённой зоны в периодических диэлектрических структурах и его применение для управления спектром теплового излучения. Проанализированы ключевые экспериментальные результаты, включая достижение суб-амбиентного охлаждения при прямом солнечном освещении. Обсуждены перспективы применения фотонно-кристаллических покрытий в строительстве и текстильной промышленности.

Фотонные кристаллы представляют собой структуры с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, в которых для электромагнитных волн формируется аналог электронной запрещённой зоны — фотонная запрещённая зона (ФЗЗ). Концепция фотонных кристаллов была независимо предложена в 1987 году Э. Яблоновичем, рассмотревшим подавление спонтанного излучения в периодических диэлектрических средах [1], и С. Джоном, предсказавшим сильную локализацию фотонов в диэлектрических сверхрешётках [2]. В диапазоне частот, соответствующем ФЗЗ, распространение электромагнитных волн в структуре запрещено, что позволяет целенаправленно управлять отражением и излучением на заданных длинах волн. Классификация фотонных кристаллов определяется размерностью периодичности: одномерные (1D) — чередующиеся плоские слои, двумерные (2D) — периодические структуры в плоскости, трёхмерные (3D) — объёмные решётки с полной запрещённой зоной для всех направлений распространения.

Одним из наиболее перспективных практических приложений фотонных кристаллов является пассивное радиационное охлаждение. Физический механизм основан на том, что любое нагретое тело излучает энергию в инфракрасном диапазоне в соответствии с законом Планка. Атмосфера Земли обладает окном прозрачности в диапазоне длин волн 8–13 мкм, через которое тепловое излучение земной поверхности может беспрепятственно уходить в космическое пространство, имеющее эффективную температуру около 3 К. Если поверхность спроектирована так, что она максимально отражает падающее солнечное излучение (0,3–2,5 мкм) и одновременно обладает высокой излучательной способностью в окне прозрачности атмосферы, то чистый радиационный поток направлен от поверхности в космос, и поверхность охлаждается ниже температуры окружающего воздуха — без затрат электроэнергии [3]. Принцип радиационного охлаждения, спектры солнечного излучения и атмосферного поглощения, а также характеристики селективного излучателя представлены на рисунке 1.

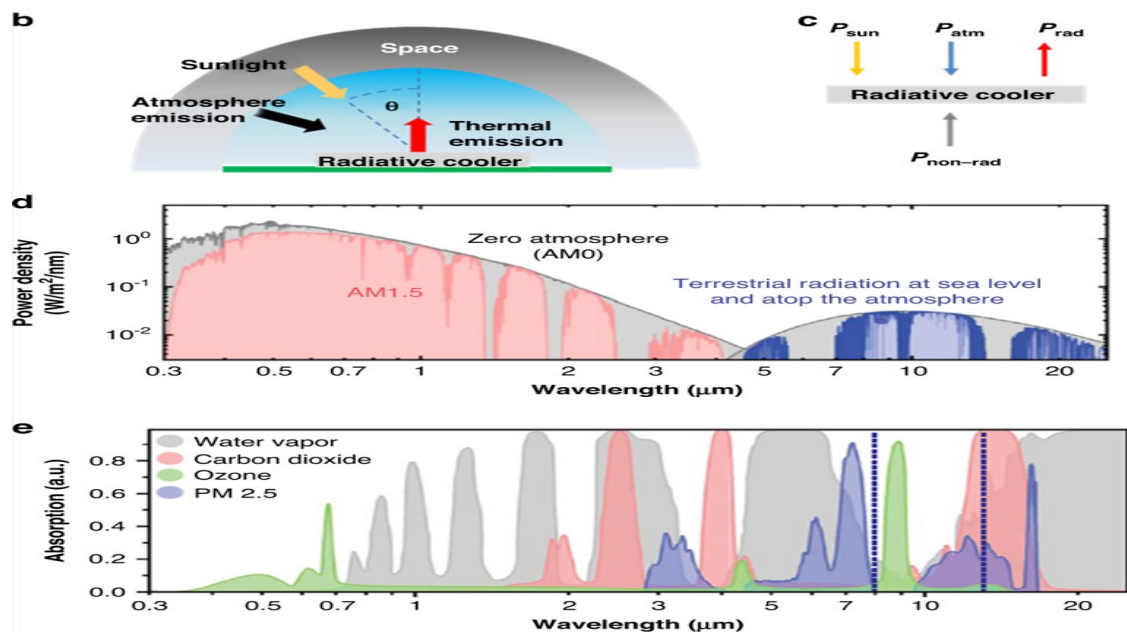


Рисунок 1 – Принцип радиационного охлаждения (b), спектры солнечного излучения (d), полосы поглощения атмосферы (e)

Именно фотонные кристаллы позволяют реализовать селективное управление спектром. В 2013 году Э. Рефаэли, А. Раман и Ш. Фань теоретически показали, что оптимизированная многослойная фотонная структура способна обеспечить ультраширокополосное отражение солнечного излучения и селективное излучение в атмосферном окне прозрачности, что достаточно для дневного охлаждения ниже температуры среды [4]. Годом позже А. Раман с соавторами экспериментально подтвердили эту концепцию, создав одномерный фотонный кристалл из семи чередующихся слоёв HfO_2 и SiO_2 на серебряной подложке. Структура отражала 97% падающего солнечного излучения и обладала высокой излучательной способностью в диапазоне 8–13 мкм. В эксперименте при солнечном потоке свыше 850 Вт/м^2 было достигнуто охлаждение на $4,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже температуры окружающего воздуха с мощностью охлаждения $40,1 \text{ Вт/м}^2$ [5]. Это стало первой экспериментальной демонстрацией дневного суб-амбиентного пассивного радиационного охлаждения.

Важным шагом к практическому применению стала разработка масштабируемых технологий. В 2017 году И. Чжай с соавторами предложили гибридный стеклополимерный метаматериал — плёнку из полиметилпентена (TPX) с внедрёнными микросферами SiO_2 , обладающими фоновым резонансом в инфракрасном диапазоне. Плёнка демонстрировала излучательную способность свыше 0,93 в окне прозрачности атмосферы и обеспечивала мощность охлаждения 93 Вт/м^2 при прямом солнечном свете. Принципиальным достоинством данного подхода является возможность рулонного производства (roll-to-roll), что открывает путь к промышленному масштабированию [6].

Современные исследования направлены на преодоление ключевого ограничения — высокоэффективные радиационные охладители традиционно имеют белый цвет, поскольку максимальное отражение солнечного света требует отсутствия селективного поглощения в видимом диапазоне. В 2024–2025 годах были продемонстрированы фотонно-кристаллические структуры, обеспечивающие одновременно яркий структурный цвет и суб-амбиентное охлаждение. Трёхмерные фотонные кристаллы, например на основе целлюлозных нанокристаллов, формируют цвет за счёт брэгговской дифракции, поглощая при этом лишь около 3% солнечного излучения, сохраняя излучательную способность свыше 90% в ИК-диапазоне и обеспечивая охлаждение на $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже температуры среды [7]. Параллельно развиваются текстильные применения: спектрально-инженерные ткани, использующие фотонные принципы управления ИК-излучением, демонстрируют температуру на $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже стандартного хлопка в условиях городского теплового острова [8].

Практическое значение фотонно-кристаллического радиационного охлаждения определяется тем, что кондиционирование воздуха потребляет до 20% электроэнергии, расходуемой зданиями. Применение радиационно-охлаждающих покрытий на крышах и фасадах способно снизить нагрузку на системы кондиционирования на 10–20% без каких-либо эксплуатационных затрат [9]. В совокупности с текстильными применениями и цветными покрытиями, допускающими архитектурную интеграцию, фотонно-кристаллическое радиационное охлаждение представляет собой энергоэффективную и экологичную технологию с существенным потенциалом для снижения глобального потребления энергии.

Список использованных источников:

1. Yablonovitch, E. *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics* / E. Yablonovitch // *Physical Review Letters*. — 1987. — Vol. 58, No. 20. — P. 2059–2062.
2. John, S. *Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices* / S. John // *Physical Review Letters*. — 1987. — Vol. 58, No. 23. — P. 2486–2489.
3. Fan, S. *Photonics and Thermodynamics Concepts in Radiative Cooling* / S. Fan, W. Li // *Nature Photonics*. — 2022. — Vol. 16. — P. 182–190.
4. Rephaeli, E. *Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling* / E. Rephaeli, A. Raman, S. Fan // *Nano Letters*. — 2013. — Vol. 13, No. 4. — P. 1457–1461.
5. Raman, A.P. *Passive Radiative Cooling Below Ambient Air Temperature Under Direct Sunlight* / A.P. Raman, M.A. Anoma, L. Zhu [et al.] // *Nature*. — 2014. — Vol. 515, No. 7528. — P. 540–544.
6. Zhai, Y. *Scalable-Manufactured Randomized Glass-Polymer Hybrid Metamaterial for Daytime Radiative Cooling* / Y. Zhai, Y. Ma, S.N. David [et al.] // *Science*. — 2017. — Vol. 355, No. 6329. — P. 1062–1066.
7. Wang, T. *Colored Radiative Cooling: From Photonic Approaches to Fluorescent Colors and Beyond* / T. Wang, Y. Liu, Y. Dong [et al.] // *Advanced Materials*. — 2025. — Vol. 37, No. 15. — Art. 2414300.
8. Wu, R. *Spectrally Engineered Textile for Radiative Cooling Against Urban Heat Islands* / R. Wu, C. Sui, T.-H. Chen [et al.] // *Science*. — 2024. — Vol. 384, No. 6701. — P. 1203–1212.
9. Lee, M. *Photonic Structures in Radiative Cooling* / M. Lee, G. Kim, Y. Jung [et al.] // *Light: Science & Applications*. — 2023. — Vol. 12. — Art. 134.